



TITLE:

固形有機物高温メタン発酵を用いたバイオマス利用システムに関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

益田, 光信

---

CITATION:

益田, 光信. 固形有機物高温メタン発酵を用いたバイオマス利用システムに関する研究. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k14927>

RIGHT:

許諾条件により本文は2010-09-20に公開

固形有機物高温メタン発酵を用いた  
バイオマス利用システムに関する研究

2009 年

益田光信



## 目次

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 序論</b>                   | <b>1</b>  |
| 1.1 研究の背景                         | 1         |
| 1.2 研究の構成                         | 3         |
| <b>第 2 章 固形有機物高温メタン発酵の経緯と展開</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1 はじめに                          | 6         |
| 2.2 欧州における固形有機物メタン発酵に至る経緯         | 7         |
| 2.2.1 概要                          | 7         |
| 2.2.2 下水汚泥処理                      | 9         |
| 2.2.3 家畜糞尿処理－湿式メタン発酵処理            | 14        |
| 2.2.4 乾式メタン発酵                     | 20        |
| 2.3 我国での固形有機物メタン発酵                | 27        |
| 2.3.1 概要                          | 27        |
| 2.3.2 下水汚泥消化                      | 28        |
| 2.3.3 し尿処理                        | 29        |
| 2.3.4 家畜ふん尿処理                     | 30        |
| 2.3.5 生ごみ・食品等廃棄物メタン発酵             | 32        |
| 2.4 まとめ                           | 35        |
| <b>第 2 章 参考文献</b>                 | <b>37</b> |
| <b>第 3 章 固形有機物の微生物学的処理法の比較と考察</b> | <b>40</b> |
| 3.1 はじめに                          | 40        |
| 3.2 システムの比較                       | 41        |
| 3.2.1 概要                          | 41        |
| 3.2.2 原料受入れ施設                     | 43        |
| 3.2.3 原料破碎施設                      | 45        |
| 3.2.4 異物除去施設                      | 47        |
| 3.2.5 発酵槽                         | 48        |
| 3.2.6 付属施設                        | 49        |
| 3.2.7 まとめ                         | 51        |
| 3.3 微生物反応の比較                      | 51        |
| 3.3.1 概要                          | 51        |
| 3.3.2 微生物反応の違い                    | 52        |

|       |                                   |            |
|-------|-----------------------------------|------------|
| 3.3.3 | 微生物分解反応実験（実験１）                    | 54         |
| 3.3.4 | コンポスト比較実験（実験２）                    | 61         |
| 3.3.5 | 微生物反応における生産物とその特徴                 | 66         |
| 3.4   | コンポスト化とメタン発酵の利用方法                 | 71         |
| 3.4.1 | 概要                                | 71         |
| 3.4.2 | 有機物原料とその利用状況                      | 72         |
| 3.4.3 | コンポスト化とメタン発酵の付加価値能力               | 77         |
| 3.5   | まとめ                               | 80         |
|       | 第３章 参考文献                          | 84         |
|       | <b>第４章 固形有機物メタン発酵技術の比較と考察</b>     | <b>86</b>  |
| 4.1   | はじめに                              | 86         |
| 4.2   | メタン発酵技術の種類                        | 86         |
| 4.2.1 | 概要                                | 86         |
| 4.2.2 | 湿式の固形有機物メタン発酵                     | 87         |
| 4.2.3 | 乾式の固形有機物メタン発酵                     | 92         |
| 4.3   | 固形有機物メタン発酵用前処理                    | 97         |
| 4.3.1 | 概要                                | 97         |
| 4.3.2 | 物理的破砕溶解                           | 98         |
| 4.3.3 | 微生物関与の可溶化                         | 98         |
| 4.3.4 | 乾式メタン発酵の前処理                       | 99         |
| 4.3.5 | メタン発酵槽内での現象                       | 101        |
| 4.4   | 固形有機物メタン発酵手法の評価                   | 103        |
| 4.4.1 | 概要                                | 103        |
| 4.4.2 | エネルギー得失                           | 103        |
| 4.4.3 | 生産物の得失                            | 104        |
| 4.4.4 | 環境性                               | 105        |
| 4.4.5 | システム全体                            | 105        |
| 4.5   | まとめ                               | 108        |
|       | 第４章 参考文献                          | 110        |
|       | <b>第５章 固形有機物メタン発酵実プラント運転結果と検討</b> | <b>112</b> |
| 5.1   | はじめに                              | 112        |
| 5.2   | 実証プラントによるメタン発酵原料別分解性              | 112        |
| 5.2.1 | プラントの設備概要                         | 112        |
| 5.2.2 | 事業系一般廃棄物による運転                     | 115        |
| 5.2.3 | 紙類のメタン発酵                          | 118        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 5.2.4 各種固形有機物のメタン発酵 .....           | 121        |
| 5.3 有機ごみの機械選別及びそのメタン発酵 .....        | 124        |
| 5.3.1 概要 .....                      | 124        |
| 5.3.2 機械選別 .....                    | 124        |
| 5.3.3 破碎選別実験 .....                  | 126        |
| 5.3.4 メタン発酵実験 .....                 | 127        |
| 5.3.5 厨芥、紙ごみをメタン発酵するごみ処理施設の考察 ..... | 128        |
| 5.4 南丹市商用メタン発酵プラント .....            | 130        |
| 5.4.1 概要 .....                      | 130        |
| 5.4.2 プラント概要 .....                  | 131        |
| 5.4.3 運転結果 .....                    | 134        |
| 5.5 まとめ .....                       | 139        |
| 第5章 参考文献 .....                      | 141        |
| <b>第6章 結論 .....</b>                 | <b>142</b> |
| 6.1 本論文の成果 .....                    | 142        |
| 6.2 今後の課題 .....                     | 146        |
| <b>謝辞 .....</b>                     | <b>147</b> |



## 第 1 章 序論

### 1.1 研究の背景

近年、わが国は大量生産、大量消費、大量廃棄に象徴されるライフスタイルから、リサイクルを考慮した生産や 3R による廃棄の削減を行うことで、持続可能な循環型ライフスタイルへと転換していくことが求められている。一方、我国の廃棄物処理・ごみ処理は其の歴史的、地理的経緯から「焼却処理」を基本にしてきており、一般廃棄物（ごみ）はその 8 割近くが焼却されているがダイオキシン問題などを抱え、新たなリサイクルの仕組みが模索されていた。そのようななかで固形有機物メタン発酵処理は、欧州から導入された技術が出発となってしまうが、我国でも産官学での再研究が始まり、2001 年には環境省のごみ処理技術の一手法として国から補助対象技術として認められるに至った。更に 2005 年には焼却よりも優位な補助基準をメタン発酵によるごみ処理（原燃料回収施設<sup>1)</sup>）は与えられ、新たな段階に至っており、実際プラント建設の手法が問われる状態になってきている。

また一方固形有機物メタン発酵が行われる場合はバイオマス利活用のなかにも見出される。1997 年京都において C O P 3 が開かれ、地球温暖化防止に向けた具体的な温室効果ガス排出削減義務数値が京都議定書<sup>2)</sup>として採決された。ここで我国は、その手法は森林の二酸化炭素吸収や C D M など広い範囲で認められながらも 1990 年レベルから 6%削減する義務が与えられた。これに伴い国内法の整備が行われ始め、1998 年には地球温暖化対策推進大綱、2000 年には焼却以外のリサイクルを認める食品リサイクル法などが作られた後、2002 年 12 月にバイオマス・ニッポン総合戦略<sup>3)</sup>が発表された。これは化石資源を除く有機物由来の再生可能な有機資源と定義づけられたバイオマスについて、其の利用促進を図り化石資源の使用量削減を目指すと共に、資源循環型社会の形成や新技術開発、農業地域の振興などを目的として農水省が主幹部署となり実施させることとなったものである。

バイオマスの利用はバイオマス・ニッポン総合戦略においては必ずしもエネルギー的価値だけではないとしている。同じ 2002 年 6 月には、経済産業省が電気事業者に対して一定以上の新エネルギー等を利用することを義務付けた所謂 RPS 法<sup>4)</sup>がスタートしているが、そこでバイオマスについては「エネルギー利用できる有機物（化石燃料を除く）」と定義しており、12 月のバイオマス・ニッポン総合戦略では「バイオマス」の定義範囲が広がってきている。

バイオマスは、太陽エネルギーによる光合成で合成されたものであるため、その賦存状態は地球表面に広く薄く広がることになる。これをエネルギーや製品として利用するということは、ある程度まとまって出てこないと利用しづら



い。既に商品価値をなくしているもの即ち廃棄物で、既に集積されているものが費用からしても実質的な利用対象となる。家畜糞尿、食品廃棄物、紙ごみ、黒液、下水汚泥、製材残材、林地残材、建築廃材、農業残渣などが今バイオマス利用できるものとしてバイオマス・ニッポン総合戦略においては挙げられている。これらの利用にあっては、遠くまで運んで集約的に処理をするより、経済的価値が低い分、排出源に近い位置で少量ずつでも様々なバイオマス利用法を組み合わせ、地域で利用するような地域活動に近い形で展開せざるを得ない場合が多い。バイオマス・ニッポン総合戦略ではそのようなことから、300 の地域を目標に、バイオマス利活用を掲げて地域整備を行う市町村を作ろうとしている。

バイオマス利用の方法としては、燃焼や炭化、加熱ガス化、バイオガス化（メタン発酵）など様々な手法があり、エネルギー利用が可能である。エネルギー利用はバイオマスを構成する成分のうち炭素に関係するが、バイオマスは他に窒素、リン、カリウムなど植物を構成する元素を有しており、エネルギー利用した後の残渣はこれらの栄養塩類を含む肥料にも利用できる。燃焼や加熱ガス化では窒素はフューエル NOx として大気に放出されるが、メタン発酵ではこれらの栄養塩類は残渣中に残るためコンポストとして利用できる。なお、バイオマスの直接のコンポスト化はバイオマスに空気を与えて好気性微生物により炭素を熱に変え水分蒸発に消費し、残った栄養塩類をコンポストとして利用する手法である。エネルギー利用はないものの簡素な設備での対応が可能で、バイオマス利活用として認められている。

バイオマス・ニッポン総合戦略におけるメタン発酵は污水汚泥処理設備ではなく、エネルギー利用できるメタン発酵が主な対象となってくる。メタン発酵は従来高濃度有機性排水処理や汚泥の消化として利用されており、伝統的な技術はそのような液処理としてのメタン発酵である。しかし、エネルギー利用を考えるなら液状物発酵より有機物濃度の高い固形有機物でのメタン発酵のほうが有利となる。欧州では家畜糞尿処理のメタン発酵に固形有機物あるいは食用油などの高濃度有機物を混合投入してバイオガス量を増大させるのが一般的になりつつある。更に固形有機物利用ではその分解速度が重要となり、中温メタン発酵より高温メタン発酵が利用され、又固形有機物ということは繊維分の多い有機物の場合が多く、この場合も高温でのメタン発酵は利用率を高める。

バイオマスの地域利用を考えると、原料としてのバイオマスは多岐にわたる。水分が少ない木質のようなものは燃焼がその中心となるが、水分の多い家畜糞尿、下水汚泥、食品廃棄物といったものはメタン発酵が中心となると考える。原料バイオマスが新鮮なものなら飼料化もできるし、ある程度水分が少な

く均質なものであればコンポスト化も可能ではあろう。紙ごみ、農業残渣などはセルロースが多いが、高温ならかなりの部分をメタン発酵してエネルギー利用ができる。

これらの施設より生み出されるエネルギーについては、カーボンニュートラルとして其の分石油燃料を削減したと見なされるが、もう一つの温暖化防止への貢献として、これらの廃棄物が放置や埋立てされていた場合は、大気中へのメタンや一酸化二窒素の放出があったわけで、それを止めることになるのも大きな貢献となる。

地域における総合的バイオマス利用システムを考える上で、固形有機物高温メタン発酵はその中核の技術となり得るものである。固形有機物高温メタン発酵の基礎的な分解反応過程や動力学的解析は既に様々なところでなされているが、この固形有機物高温メタン発酵プラントが各所で建設運転され始めていることに鑑みると、実際に本技術を適用する場合の諸問題について解答を与えるものがあることは重要である。

そこで本研究では固形有機物高温メタン発酵の技術について、その成立、他の微生物学的手法との比較、液処理メタン発酵法との比較、実プラント運転における問題の検討等を行う。本研究により固形有機物高温メタン発酵技術が、適用方法や特長を明らかにされ、我国の環境行政や新エネルギー行政のなかで、正しい位置づけを得ることができるようになると考えられる。

## 1.2 研究の構成

固形有機物メタン発酵は近年様々な分野で利用されているが、研究ではまず、このようなエネルギー利用としてのメタン発酵はどのような経緯を辿ったかについて調べ、今後の展開を示す。次に、固形有機物を微生物によって処理する考えるなら、従来から好気性コンポスト処理がある。メタン発酵するか否かを考えるなら、コンポスト処理との比較が常に必要となる。そこで同じ原料によるメタン発酵と好気コンポスト化を行い、有機物分解の仕方にどのような特性があるのかを研究し利害得失を明らかにする。次に固形有機物メタン発酵の様々な手法について、主に湿式法と乾式法の違いについて考察する。次に乾式の固形有機物メタン発酵の実証プラント、商用プラントについて、そこで行われた運転、研究、実験などを紹介し、それがどのように今後の設計に生かせるか、或いは将来のごみ処理にどんな形を提案してゆけるかについて考察する。

論文としては第2章以降、以下のように構成する。

第2章の固形有機物高温メタン発酵の経緯と展開では、文献などの調査により固形有機物メタン発酵の経過、現状、意義等について海外や我国の状況を示

し、将来を考察する。

**第3章の固形有機物微生物処理法の比較と考察**では、固形有機物の微生物処理方法を考える。同じ固形有機物原料について、メタン発酵し引き続きコンポスト化を行なう場合と直接好気コンポスト化を行う場合につき、その分解特性の違いを検討するとともに、最終コンポストになったものについても比較する。微生物分解された部分はメタン発酵ではバイオガスがエネルギー源として取り出せると同時に、残った残渣は有機物必須の栄養塩類を含むためコンポストとして利用できる。直接の好気コンポスト化では微生物分解された部分は発酵熱や臭気となり放散してしまうが、コンポストを得ることは簡単に可能である。システムや製品を比較しその利用方法を考える。

**第4章の固形有機物メタン発酵技術の比較と考察**では、固形有機物メタン発酵について各種手法を比較検討する。固形有機物に関するメタン発酵法としては、固形有機物をほとんどそのまま発酵槽に入れてしまう乾式と、丁寧な選別と可溶化を行って液状分のみメタン発酵する湿式がある。前処理を丁寧に行うことで発酵槽での安定運転は確保されるが、その過程で除去されるバイオガス化可能成分、それらのコンポスト化と臭気の問題、消費エネルギーの問題などを比較考察する。またごみ処理としてのメタン発酵ではどのような形態が考えられ、それらはどのようなエネルギー、資源循環性、環境性を有するのかを考える。

**第5章の固形有機物メタン発酵実プラント運転結果と検討**では、固形有機物高温メタン発酵の3 t/dの実証プラントと50 t/dの商用プラントにおいて得られた知見と特性や能力について検討を行う。実証プラントではアンモニアによる発酵阻害、各種有機物の発酵特性及びそのデータを用いたプロセス設計例等を考える。またごみ処理への適用する場合の前処理実験を行って、そこから得られた原料でメタン発酵を行い、目的のバイオガス発生量になることを確認した。更にその結果をごみ処理施設への応用した場合の新しいごみ処理方法を検討する。商用プラントでは、その運転経緯をみるとともに、他では例をみない単位原料あたりのガス発生量となった理由を探り、エネルギープラントとしても有効なシステムに固形有機物メタン発酵プラントはなり得ることを示す。

**第6章は結論**であり、本研究で得られた成果について要約する。

## 第 1 章 参考文献

- 1) 環境省ホームページ：第 30 回中央環境審議会廃棄物リサイクル部会 資料  
高効率原燃料回収施設

<http://www.env.go.jp/council/03haiki/y030-30/mat04.pdf>

- 2) 環境省ホームページ：地球温暖化防止京都会議 COP3

<http://www.env.go.jp/earth/cop3/index.html>

- 3) 農林水産省ホームページ：バイオマス・ニッポン総合戦略

<http://www.maff.go.jp/biomass/senryaku/senryaku.pdf>

- 4) 経済産業省ホームページ：電気事業者による新エネルギー等の特別措置法

<http://www.rps.go.jp/RPS/new-contents/pdf/rpsjoubun.pdf>

## 第2章 固形有機物高温メタン発酵の経緯と展開

### 2.1 はじめに

メタン発酵は古くから行われた、有機廃棄物を衛生的に処理するための方法である。其の手法も単に地中に穴を掘って廃液を容れておくだけのものから、覆いをしてバイオガスを集め生活に利用しようとするものがあり、更には発酵槽を一定の発酵し易い温度に保つことがなされ、適切な反応を目指す攪拌、滞留時間の設定などがなされ、プラントとなってくる。原料はどの国においても、最初は糞尿（家畜、人間）が一般的で、それは放置されれば疫病の原因となるがメタン発酵されれば農作物肥料として有益なものとなる訳で、メタン発酵は古来重宝されてきた。

プラントとしては欧州で1900年ごろから、日本では1920年代くらいから下水汚泥の消化としてメタン発酵は普及しはじめた。1930年代にはバイオガスのエネルギー利用が進み、発電や燃料として利用され始めた。京都市では当時既にこのバイオガスを使って自動車を動かす試み<sup>1)</sup>がなされている。以降、下水汚泥の嫌気性消化は汚泥の処分として焼却法が登場するまで其の主流であった。

一方我国の汲み取りし尿については戦前までは寄生虫や疫病対策として野ツボ、大正式多槽便所、厚生省式改良便所などがあったが、戦後、し尿の衛生的処理利用の方法として下水嫌気性消化で実績のあるメタン発酵が位置づけられた。さらに普及に向けて1952年厚生省が補助金をつけることになり、全国に広がった<sup>2)</sup>。当時糞尿の肥料としての利用は化学肥料の増加で先細りになっていたが、衛生的、環境的視点からメタン発酵の促進がなされた。以降1970年代後半までメタン発酵はし尿処理法として定着した。

メタン発酵のエネルギー利用を促進する生ごみ等のメタン発酵の開発は1973年の第4次中東戦争をきっかけに起こったオイルショックにより日、欧米で始められている。日本では1974年からの通産省サンシャイン計画が始まり、そのなかで1976年には「都市固形廃棄物の資源再生利用システム」に「都市ごみのメタン発酵サブシステム」開発が設定され、研究が始まっている<sup>3)</sup>。しかし、第2次のオイルショックも平穏になった1980年にはほぼ終了しており、以後1990年中頃から始まるエネルギー節約型し尿処理施設で再度登場するまで都市ごみ等固形有機物のメタン発酵処理は話題にならなかった。

一方欧米では少し異なっている。ドイツでは1980年あたりから畜産糞尿に廃食用油などを入れてバイオガス量を増加させて採算をとろうとするプラントがスタートし、政策的支援もあり、1990年代には爆発的に増加した<sup>4)</sup>。又、デンマークでは1987年から国の指導のもと、家畜糞尿と農業残渣を扱う10施設の大規模集中バイオガスプラントを建設し問題点を探り、更に1992年から2次計

画を推進し、家畜糞尿と生ごみなど固形有機物を混合メタン発酵する事業を推進し始めた<sup>5)</sup>。

固形有機物だけのメタン発酵もこのような家畜糞尿メタン発酵が増加する中現れてきた。世界最初の大規模なプラントは 1978 年に建設された米国フロリダの“RefCOM”(Refuse Conversion to Methane) プロジェクトによる 100 t/d の AD/MSW 処理(都市ごみのメタン発酵処理)実証実験がある<sup>6)</sup>。1985 年にそのプラントは攪拌軸への異物の絡み付などのトラブルを経て終了している。これ以降、米国ではなく主に欧州において AD/MSW 処理の研究、プラントの建設は盛んになってゆく。1984 年には Dranco がベルギーで、1988 年には Valorga がフランスで都市ごみのメタン発酵処理プラントを建設する<sup>7)</sup>。1994 年には、このような状況にある AD/MSW 処理(都市ごみのメタン発酵処理)について、IEA Bioenergy Agreement から“Biogas from Municipal Solid Waste”が報告された。そこでは都市ごみのメタン発酵処理の有利性が述べられており、1993 年 11 月時点では 15 の都市ごみのメタン発酵処理プラントが既に稼動しており、20 のプラントが建設中または計画中であると報告されるような状態となった。

一方我国では 1997 年厚生省が「汚泥再生処理センター」構想を打ち出し、し尿処理汚泥と生ごみの混合メタン発酵エネルギー回収施設がし尿処理プロセスに求められることとなった。これに対し、いずれも欧州から導入された湿式のメタン発酵技術をもとに、メビウス(Waasa)、REM(ENTEC)、リネッサ(S-Uhde)などのシステム構築がなされた。また、AD/MSW 処理(都市ごみのメタン発酵処理)についても欧州からの技術導入が 1997~2000 年にかけてなされ、Dranco、Kompogas などの乾式のメタン発酵技術が導入され各地で実証試験がスタートし始めた。環境省は 2001 年メタン発酵技術をごみ処理手法の一つと認め市町村ごみ処理事業への補助を可能にした。

## 2.2 欧州における固形有機物メタン発酵に至る経緯

### 2.2.1 概要

欧州においてメタン発酵は始まったと言える。1770 年頃イタリアの Volt が沼気を取り出し燃焼実験を行い、1821 年これがメタンであることがイギリス・ファラデーにより突き止められた<sup>8)</sup>。1884 年フランス・パスツールが馬糞よりバイオガスを取り出しこれを街路灯に利用することを提案している<sup>8)</sup>。この頃から汚水処理としても認識されるようになり腐敗槽ができた。我国でも単独浄化槽として最近まで規格化されて家庭糞尿処理に利用されていた。20 世紀になると糞尿及び下水の処理において処理水水質の向上が求められ、沈殿法、散水濾床法、活性汚泥処理法と機能が向上してくる。このときの汚泥の消化処理と

しても腐敗槽は採用されるようになり装置が構成されるようになる。初めはドイツ Imhoff により上部沈殿槽下部消化槽<sup>9)</sup> という形が提案され、それは直ぐに独立した消化槽へと発展するとともに、消化の条件が明確にされてくる。第二次大戦前にほぼ現在の活性汚泥法と消化槽の組み合わせの形は完成されており、我国にも導入されている。飛躍的に装置としての緒元を整えるのは戦後の 1950, 1960 年代である。これ以降下水汚泥処理、し尿処理の手法としてメタン発酵は標準化され、環境問題の認識の向上に伴い世界中に建設されてきた。そして 1980 年代、オイルショックの後、メタン発酵はそのエネルギー取り出し機能が再び注目され、液体だけでなく固形有機物を消化することが検討され始めた。

固形有機物を消化して積極的にバイオガスを取り出し、エネルギーとして利用する考えは、第 2 次大戦中ドイツで Imhoff により提案<sup>10)</sup> され、家畜糞尿に食用油、牛内臓、リグニン、穀物などを混合して試されている。オランダでは Popel も同じ頃家庭ごみのメタン発酵を行っている<sup>10)</sup>。戦後も 1950 年にはシュミット・エッグスグリュウ社により家畜糞尿に野菜残渣、馬鈴薯等を入れるメタン発酵プラントが建設され、ガスはトラクタ燃料に利用されている<sup>11)</sup>。当時そのようなプラントは西ドイツで 50 程度建設されたが、1955 年以降の石油価格の下落により、2 基を残してそれらのほとんどが姿を消した<sup>11)</sup>。

1973 年オイルショックが世界を覆うことにより、再びバイオガスの施設建設が盛んになってくる。1980 年には西ドイツではバイエルン州で 15 基、バーデン・ヴェルテンベルグ州で 10 基が登録される<sup>12)</sup>。以降ドイツにおいてはこの南部を中心に家畜糞尿用のバイオガスプラントが多く建設される。1992 年にはミュンヘン近郊にバイオガス組合が発足し、農家、コンサルタント、メーカーが協力してバイオガス事業を育ててきている<sup>13)</sup>。農業残渣を投入しながらメタン発酵を行うが、廃食用油が主に利用されている。この場合、施設は液処理用の建設費でありながら、バイオガスは固形有機物メタン発酵なみの 1t あたり 90m<sup>3</sup> 程度を発生させて事業性を追求している<sup>14)</sup>。施設の数 は 1992 年に 140 箇所程度であったものが、1998 年には 620 箇所、2000 年の再生エネルギー法成立を受けて 2002 年には 1900 箇所、更に 2005 年には 2700 箇所となっており、総発電出力は 650MW でドイツの国内総発電出力の 1% を占めるに至っている<sup>4)</sup>。

デンマークでは家畜糞尿処理でメタン発酵を行うにあたって、1980 年代の単独農家でのプラント結果が良くないため、集合して大きい施設とし、これに固形有機物を投入してバイオガス量を増大させて発電し、収支をとろうというプロジェクトが立ち上がってきた。1988 年よりエネルギー省が中心となり、「集中バイオガス事業計画」<sup>5)</sup> が実施された。対象は 1984 年に建設されたものも

含め 10 基で、これに対し、どのような経済的インセンティブを与えるべきか、どのような原料にするか、運転体制はどうすべきか等が検討された。1992 年からは新たに 3 基加わり「2 次事業計画」が実施された。農業残渣を発酵槽へ投入し、原料 1 トンあたり  $20\text{m}^3$  程度のバイオガス量であったものを  $40\sim 70\text{m}^3$  程度に増加させることができ、地域の熱電供給公社に熱や電力を売った。その収入金額は建設費の償却を可能にするものもあり、農業の環境保全と再生可能エネルギーの生産を目指すヨーロッパでは各国が注目した。

一方、家畜糞尿との混合でなく、生ごみ等だけを原料とする固形有機物のメタン発酵は次のように始まってきた。まず、1987 年フランスの Amiens では  $55,000\text{t}/\text{年}$ （後年増設し  $85,000\text{t}/\text{年}$ ）の都市ごみ処理を Valorga のメタン発酵で開始した。ガス量はごみ  $1\text{t}$  あたり  $150\text{m}^3$  程度発生させて大きなエネルギーを得ることができ、メタン発酵プロセスの新たな動きが始まった。スイスにおいては 1991 年、Kompogas がコンポストプラントの改良版として、メタン発酵プラント  $8,500\text{t}/\text{年}$  を稼働させた。原料はコンポスト製造用の生ごみや農作物残渣、剪定枝などからスタートしており、特に剪定枝はコンポスト製造時の通気性改良材としても有用であった。この原料についてメタン発酵すると、原料  $\text{t}$  あたり  $120\text{m}^3$  程度のバイオガスをとることができ、更にコンポストも良好なものを得る事ができた。Dranco は 1984 年に  $60\text{m}^3$  のメタン発酵槽でデモプラントを建設後 1992 年にはベルギーで生ごみのメタン発酵  $20,000\text{t}/\text{年}$  のプラントを運転させ始めた。

このように各所で固形有機物に関連したメタン発酵システムが立ち上がってくる中、1994 年に先に述べた IEA の“Biogas from Municipal Solid Waste”が発表され、当時の固形有機物メタン発酵に関する各種のシステムや市場について分類整理がなされ、その第一段階を越えた。

第二段階は固形有機物のメタン発酵に関して国際的な学問上の枠組みとして、1992 年からは“Anaerobic Digestion of Solid Waste”が開催されるようになったことであろう。1999 年 Barcelona, 2002 年 Munich, 2005 年 Copenhagen, 2008 年チュニジアと開催されてきている。これは、焼却によらない有機ごみの処理という環境性や、再生可能なエネルギーが取り出せ、更に埋め立てで発生するメタン放出の防止が図られるという地球温暖化防止の観点からの価値などにより施策のなかで取り込まれるようになったことに呼応しており、環境とエネルギーを繋ぐ技術として期待されている。

### 2.2.2 下水汚泥処理

下水処理における汚泥は、最初沈殿池の汚泥と活性汚泥処理最終沈殿池からの余剰汚泥とがその対象となる。最初沈殿池の汚泥は微生物に食される前の有



機物も多く、豊富な有機物源となるが、余剰汚泥は菌体が大分を占めるため、窒素含有の比率も高く消化しにくい。両者の混合によりメタン発酵においては餌と菌体との良いバランスがもたらされることになる。

簡易な糞尿処理としての腐敗槽を、沈殿池と組み合わせて沈殿池汚泥の引き抜き貯槽兼消化槽として利用することを提案したのは1899年アメリカのClarkであるが、1903年イギリスのTravisはこれを図2-2に示す上部沈殿池下部腐敗槽の二階槽とし普及を図った<sup>15)</sup>。1906年ドイツのImhoffは図2-1に示すように沈殿槽と腐敗槽の間の仕切りを改良し、腐敗槽からのガスや水質が沈殿処理に影響するのを防いだ<sup>16)</sup>。

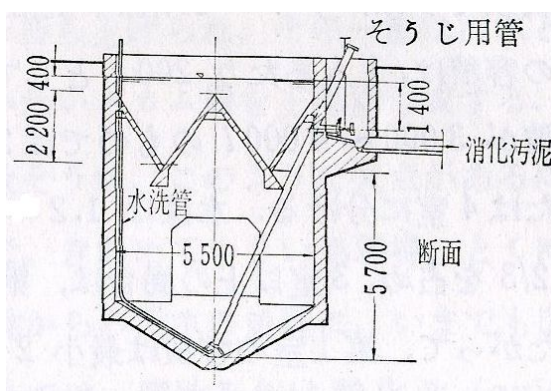


図 2-1 Imhoff 槽<sup>16)</sup>

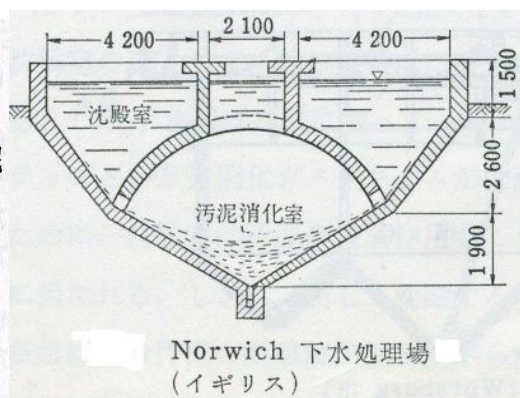


図 2-2 Travis 槽<sup>15)</sup>

更に完全に汚泥消化室の沈殿池への影響を遮断するため、独立した消化槽ができた。1912年イギリス Birmingham に沈殿池からは独立した開放型の消化槽が設置された。ドイツでも開放型消化槽が、土堤で囲まれたもの (Bensheim) やコンクリート製 (Lampertthiem) 等として作られた<sup>17)</sup>。このため設計消化温度は8~10℃とし、消化日数は100日程度としている。

これらはいくまで廃液処理が目的であってエネルギー利用は考えていない。そのような施設の考え方の開放型消化槽は、20世紀初頭インドネシアに進出したオランダの農園 (現在は国営企業化) に現在も多い。例えば1915年オランダの H.V.A によりインドネシアに設置された農園 (プランテーション) Dolok Ilir ではアブラヤシからパーム油を製造しているが、そこから出る廃液 POME については、開放型消化槽で BOD の過半を除去し、それに続くラグーンで浄化処理されている。

密閉型消化槽は1920年イギリス Cole Hall 処理場で始まり、ここでは分離2段式の Kremer 消化を図2-3のように改良し、消化ガスを利用して汚泥ポンプを動かした<sup>18)</sup>。更に1925年にはドイツ Essen 市に、1926年にはアメリカ Antigo

市に、加温装置とガス捕集装置をつけた独立した密閉型消化槽が建設された<sup>18)</sup>。  
日本では 1934 年および 1939 年に京都市の吉祥院処理場および鳥羽処理場に加熱攪拌装置を有する消化槽が建設されている。これは土堤で囲まれており、保温が考慮されている<sup>19)</sup>。

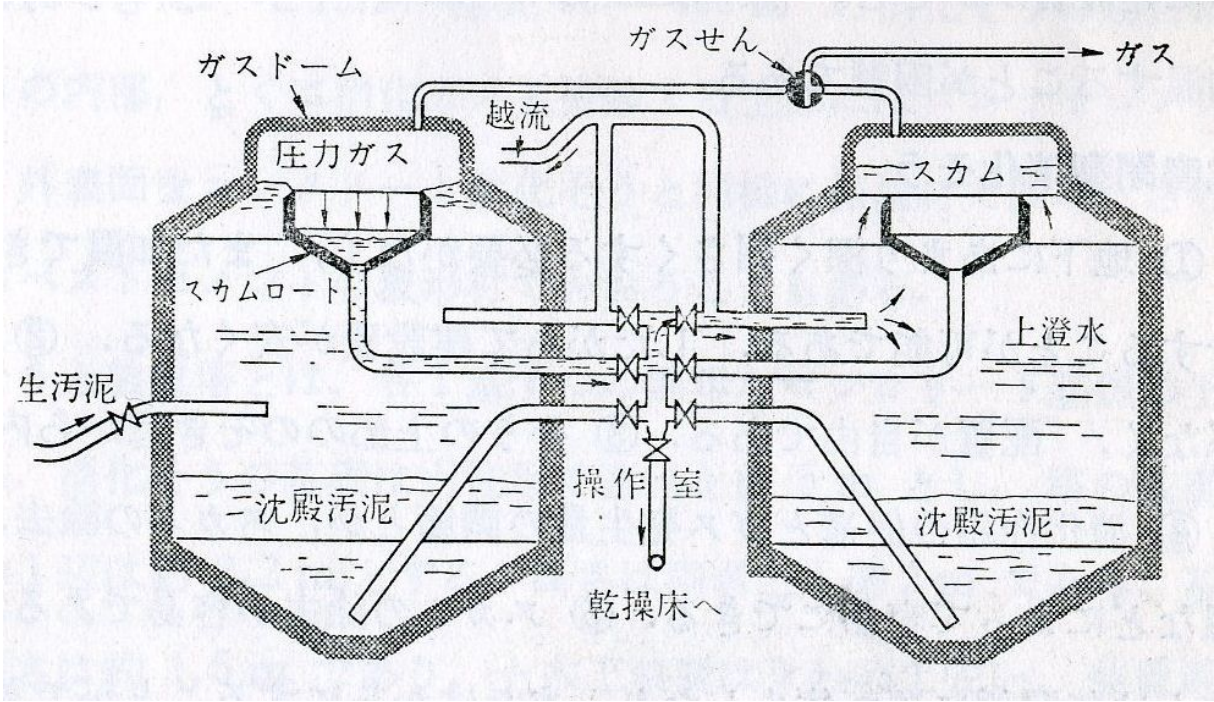


図 2-3 Kremer 消化槽の改良型<sup>18)</sup>

消化温度については、1942 年京都市中條都一郎氏は、外国経験者（米国）の値として以下の表 2-1 を示し、消化効率の良い温度域に不連続があることについて、「この事は甚だ疑問のあるところであるが、遺憾ながら実験に従って其の正否を確かめるまでに至っていない」としている<sup>19)</sup>。本表ではやや中温域活動帯が低く（27～30℃）認識されているが、高温活動帯は 55℃ 近辺としている。

表 2-1 汚泥消化期間と温度との関係<sup>19)</sup>

| 温度 (F)   | 50      | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 | 130 |
|----------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 消化期間 (日) | 200～300 | 75  | 45  | 32  | 38  | 45  | 10  |
| 能率       |         | 2.3 | 1.4 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 0.3 |

岩井重久、申丘徹らによれば、図 2-4 に示されるように Fair と Geyer とが 1956 年高温域での細菌活動を記述しており、これでは中温域活動帯を 35℃、高温域活動帯を 55℃ 近辺としている<sup>20)</sup>。

これらの経緯から、メタン発酵における最適な温度域というのが、この時期の 1940～50 年頃に定まってきたのであらうと考えられる。

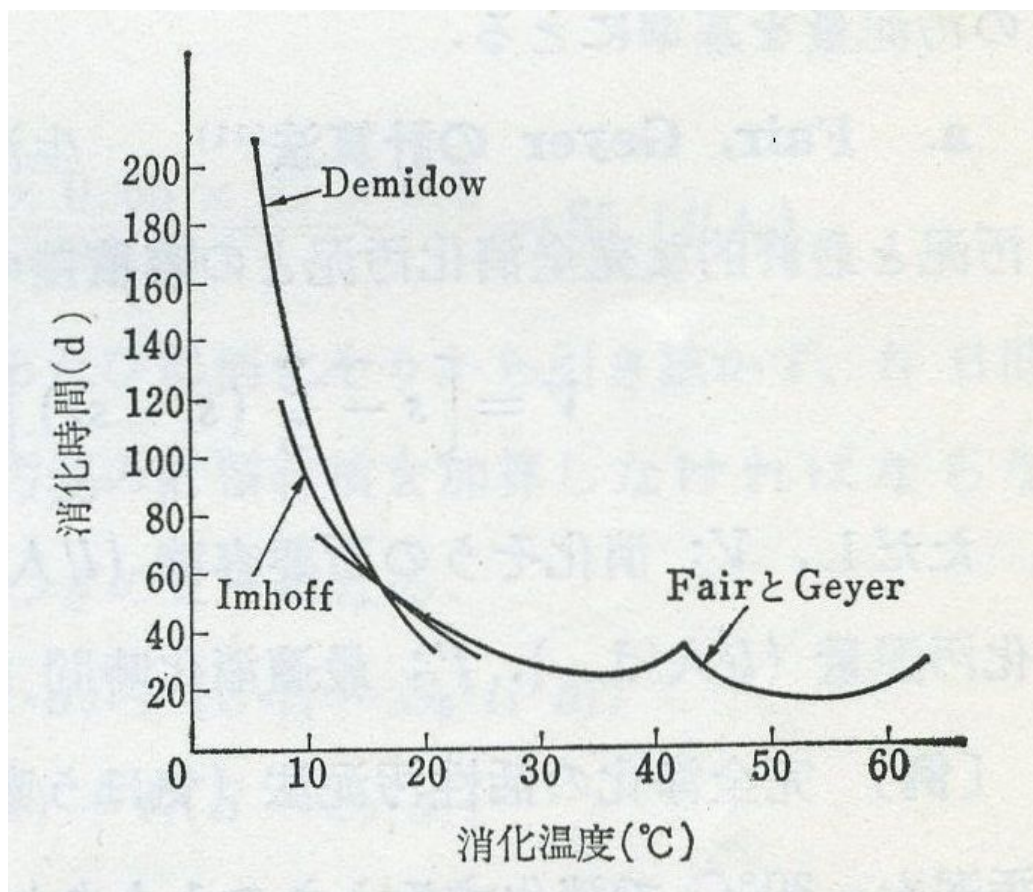


図 2-4 消化温度と最適消化時間との関係<sup>20)</sup>

発酵槽の形状にあつては、力学的にどうか、保温構造はとり易いか、建設しやすいか、適した攪拌方法は何か、スカムの生成を少なくする形状は何か、沈殿物は排除し易いか、更には美しい形かというような点から選ばれる。このような観点から、ドイツでは 1950 年代より卵形消化槽が建設され始めた。これらの例を図 2-5 に示す。Dyckerhoff&Widmann 社（通称ディビダーク社）<sup>21)</sup> によって開発されたもので、P S コンクリートの長所を生かし、対流むら、沈殿むら、スカム生成蓄積が少ないとされている。ドイツ以外のヨーロッパでは亀甲形、米国では円柱形が多いといわれる。



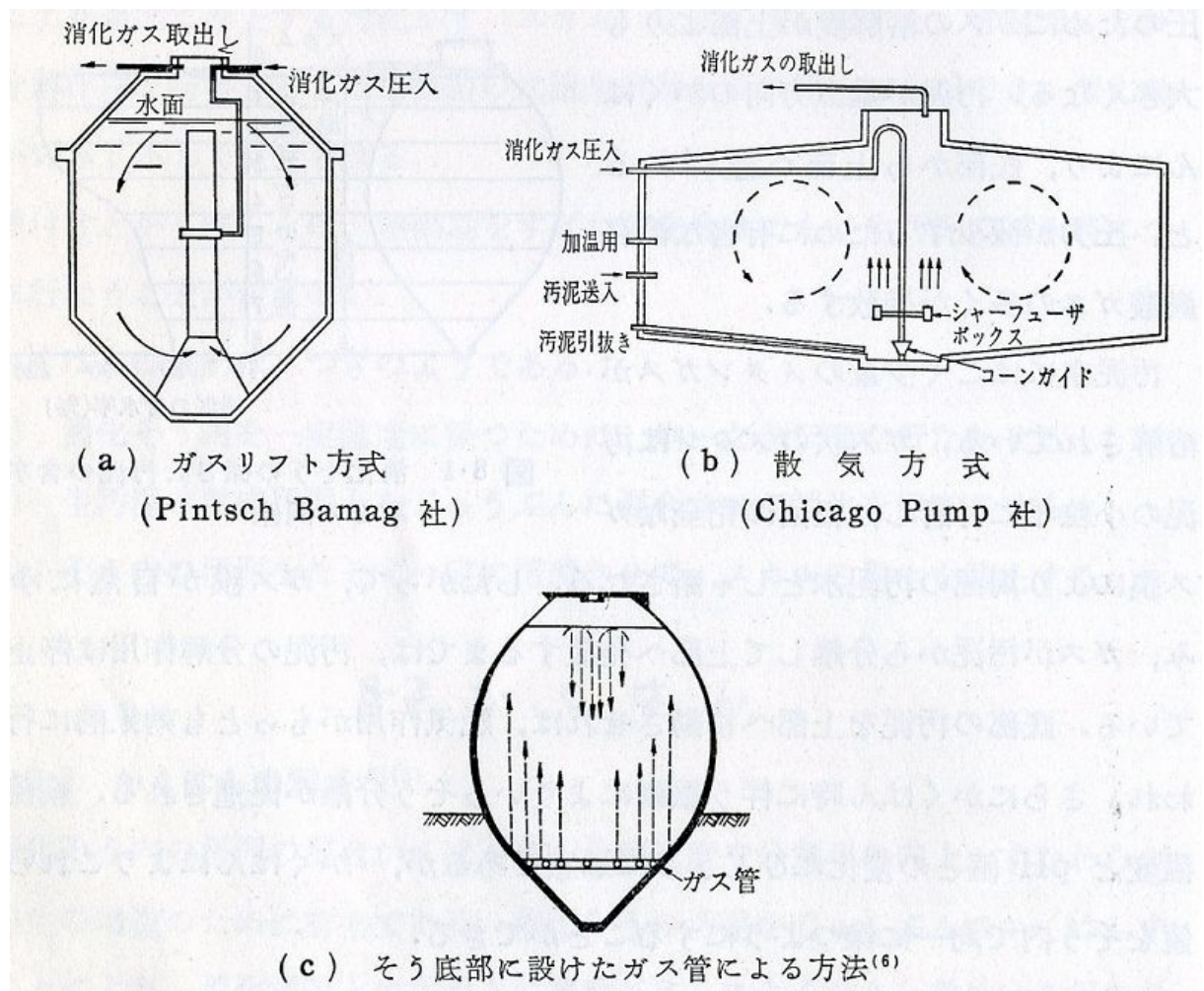


図 2-5 各種ガス攪拌方法<sup>22)</sup>

これらの形状は、汚泥という液状の均質な原料に対し、メタン発酵を完全混合型の反応で行わせようとする場合にとられた形状であるが、原料が固形有機物の場合は他にも様々な形状が取られるようになる。

下水処理施設におけるメタン発酵は汚泥の消化減量化、それに伴う環境保全が第一目的で、必ずしもエネルギー取得が目的ではない。また下水道及び下水処理施設は都市機能における基幹施設であり、長期計画の中で長期の運転に耐えるものとして建設されるため、十分な強度、施設規模、施設機能が要求される。

我国でも近年この施設規模の余裕のあるところを利用して、固形有機物を投入してバイオガス収量の増加を行う試みが一部始まっている。しかし原料の取扱い官庁の異なることもあり、未だ広がるには至っていない。

比較的小規模なドイツ、Baden-Baden 市の下水処理場では、下水汚泥消化槽の負荷が少ないので生ごみの有機分を投入するシステム図 2-6 を BTA 社から導

入している<sup>23)</sup>。生ごみは破碎後、一旦攪拌水槽（ハイドロパルパー）に投入されて一種の可溶化を行いながら、可溶化されないプラスチックや木片などは浮上分と沈降分に分けこれを排除する。更に静置後全体を遠心脱水機にかけ、脱水ケーキはコンポスト場へ送る一方、濾液は濃厚な有機分を含むのでこれを汚泥消化槽に送り、バイオガス化してエネルギー回収している。

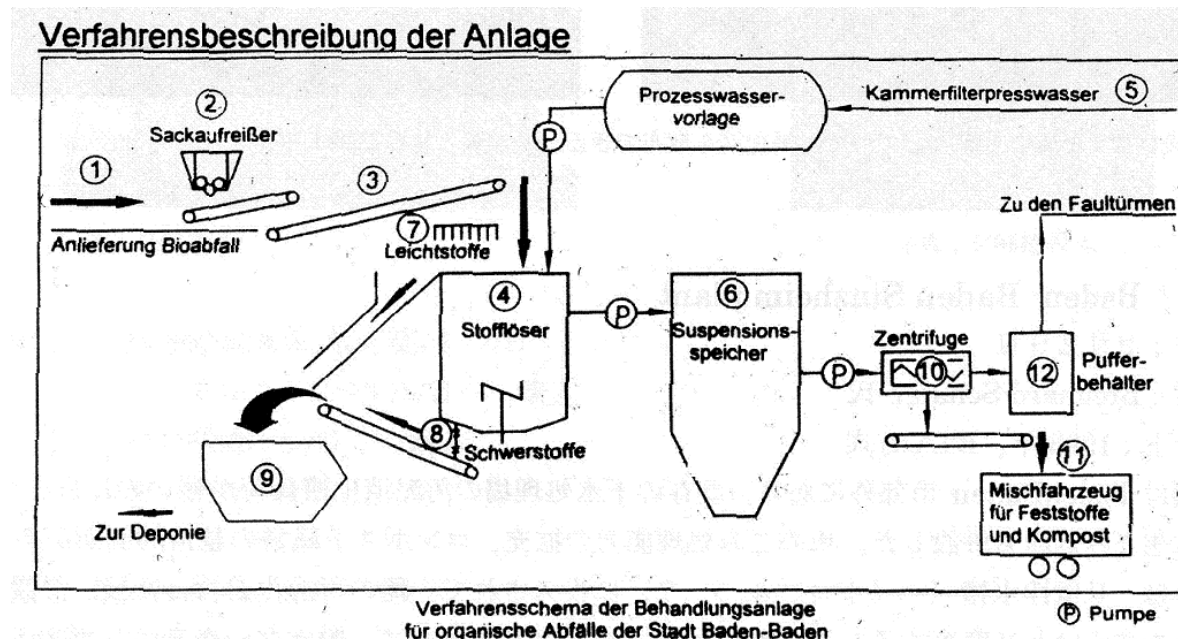


図 2-6 Baden-Baden 市での有機ごみ処理フロー<sup>23)</sup>

消化槽へは、汚泥 200 t / d、生ごみ液 10 t / d が投入されて、それぞれから 3,000m<sup>3</sup>/d、1,000m<sup>3</sup>/d、合計 4,000m<sup>3</sup>/d のバイオガスが得られている。消化槽へは液体しか入らないのでここでの機械的トラブルは起こらないであろう。しかし、この 1,000m<sup>3</sup>/d のバイオガス、ほぼ 70kW (1,700 kWh/d) を得るのに、破碎、攪拌、遠心脱水と大きな動力機械を装備するため、ほとんど余剰電力の増加はないものと思われる。ごみ処理やコンポスト原料の前処理ができるという別の意義付けが本施設では必要となる。

### 2.2.3 家畜糞尿処理－湿式メタン発酵処理

固形有機物を投入しながら家畜糞尿をメタン発酵する施設を、エネルギー回収施設として位置づけ、地域の熱電供給公社と組み合わせて、其の事業性を国として追求し始めたのは、デンマークである。このようなメタン発酵を、固形有機物だけでメタン発酵する乾式メタン発酵と区別する意味で、「湿式メタン発酵」と呼ぶようになったのは後年である。

デンマークでは 1988 年～1991 年の「集中バイオガスプラント事業計画」引

き続いて 1995 年まで行われた「第二次事業計画」により、家畜糞尿用メタン発酵プラントを集合農家で有機性廃棄物も原料とすることで、採算の取れるプラントの可能性が 10 のプラント、更に 3 プラントについて検討を行った<sup>5)</sup>。

1970 年代のオイルショックを機にデンマークは、1976 年エネルギー計画を策定し、石油から北海の天然ガスへのシフト、既存の地域熱電供給システム (CHP) への発電所連結、更に再生可能エネルギー資源への開発に着手した。デンマークの CHP は 1904 年にスタートしており、1920～30 年代に本格的に稼動を始め、戦後は技術的な発展をその配管網に加えた。普及率は 1972 年 29% から 1988 年には 55% まで上がり、バイオガスプラントを建設するとその地域の電力と熱の両方に利用できるインフラとなっていた。1985 年には原子力電力の採用を否決した。1995 年には炭素税を導入して再生可能エネルギーの導入を後押しし、1996 年には「エネルギー 21」で 2005 年までに二酸化炭素削減 20% (1988-2005) 2030 年までに二酸化炭素削減 50% (1990-2030) とし、これを再生可能エネルギーの増大とエネルギー消費削減で賄う計画である。2000 年の再生可能エネルギー比率は総生産エネルギーの 7.4% に達している。尚、総生産エネルギーは 1972 年に 2% であった自給率が 1997 年には 100% となっている<sup>24)</sup>。このような再生可能エネルギーの優遇策は家畜糞尿処理にも影響を与え、メタン発酵エネルギー利用計画を大きく後押ししている。ちなみに日本での再生可能エネルギー電力の購入義務化 (RPS 法) は 2002 年にやっとスタートし、其の義務率は 2003 年で 0.39% 最終目標年度の 2010 年で 1.35% である。

デンマークの家畜糞尿のメタン発酵には環境上の理由も大きい。デンマークの土地は極端な伐採のため表層土が薄く、汚染の影響を受け易い。1991 年に硝酸塩指令が欧州評議会より出されるが、デンマークでは既に家畜糞尿については 6 ヶ月分以上の貯留槽を持つことを義務付けており、牧草の育つ時期にしか散布できないようにしていた。また、面積あたりの家畜飼養頭数の制限、面積あたりの窒素施用量の制限を設けて、地下水の保全に勤めた。6 ヶ月分の貯蔵施設を建設するのなら、ただのタンクではなく、メタン発酵機能をもたせてエネルギー回収と糞尿性状の改善を図ろうということが、家畜糞尿メタン発酵のスタートの考え方である。施設の貯蔵容量は参加農家にその容量の権利を分け与えることが出来るようになっている。集合してメタン発酵施設を建設し、建設単価を抑え、維持管理作業を農作業から切り離しながら、環境とエネルギーでのメリットを追求しようとした。

デンマークのバイオガス事業計画については 1995 年、デンマークエネルギー省から以下のようなことが報告されている。

最初の 10 のプラント (一部は 1984 年に建設されており、最新のものは 1991

年に、21～40%の補助金を受けながら建設された) については、プラントの技術的な問題だけでなく、建設費、運転経費、収入についてデータが集められ、その違いや原因が検討されている。結局、収支のバランスがとれる見通しがあってプラントが建設され、ここで始めて技術が問われるようになる。プラントはいずれも複数農家の家畜(乳牛)糞尿を固形有機物と一緒にメタン発酵し、其のバイオガスエネルギーを地域の熱伝供給公社に販売し、消化液は農地に還元するもので、その計画概略を表 2-2 に示す。

表 2-2 対象の 10 バイオガスプラントの諸元 (1994 年段階) <sup>25)</sup>

|                       |                     | V.Hjermislev | Vegger | Skovsgård | Davinde | Sinding | Fangel | Revninge | Ribe  | Lintrup | Lemvig |
|-----------------------|---------------------|--------------|--------|-----------|---------|---------|--------|----------|-------|---------|--------|
| Total feedstock       | m <sup>3</sup> /day | 44           | 58     | 53        | 27      | 132     | 152    | 37       | 401   | 385     | 453    |
| Manure                | %                   | 63           | 73     | 70        | 86      | 70      | 77     | 75       | 84    | 67      | 79     |
| Organic waste         | %                   | 37           | 27     | 30        | 14      | 30      | 23     | 25       | 16    | 33      | 21     |
| Digestion temperature | °C                  | 37           | 56     | 35        | 37      | 52      | 37     | 44       | 53    | 37      | 52     |
| HRT                   | days                | 34           | 15     | 29        | 28      | 16      | 21     | 15       | 12    | 20      | 17     |
| Gas production        | m <sup>3</sup> /day | 4400         | 4500   | 3100      | 900     | 7100    | 7100   | 1200     | 11800 | 11400   | 14800  |
| Gas utilization       |                     | CHP          | CHP    | CHP       | Boiler  | CHP     | CHP    | Network  | CHP   | CHP     | CHP    |

これらプラントの収入構成は比較的后年建設された4プラントにつき、図 2-7 に示す。Fangel は当初発電機を所有せず、発生バイオガスを熱として地域の熱電供給公社へ販売していたが、後年発電機を設置している。

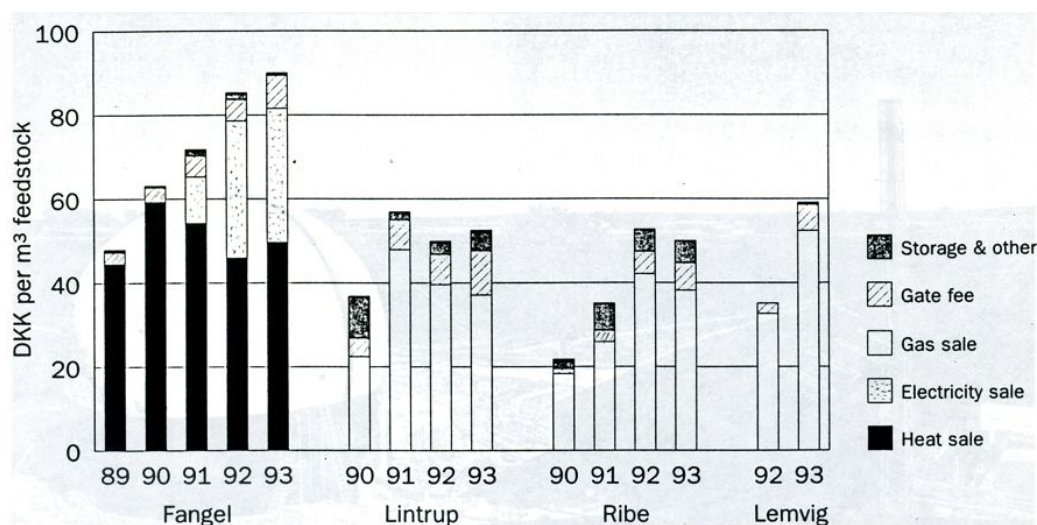


図 2-7 主要 4 プラントの原料 1 m<sup>3</sup> あたりの収入 <sup>26)</sup>



いずれのプラントもその収入の過半はバイオガスエネルギーによるもので、多くのバイオガスを産出することが収入を増やすことがわかる。

支出については図 2-8 に示す。まずほとんどの支出総額が図 2-7 でみた収入を上回ることがなく、事業性を考えることができる状態にある。(Ribe では初年度赤字ではある。) その支出に占める大きな負担は、運搬費である。これは原料の糞尿と、出来上がった消化液の配布に関わるものである。農家からすると、糞尿処理に費やす仕事から解放されることは極めて重要で、糞尿の運搬をバイオガスプラント側が受け持つことは農家がそこへ加入する大きな動機になっている。

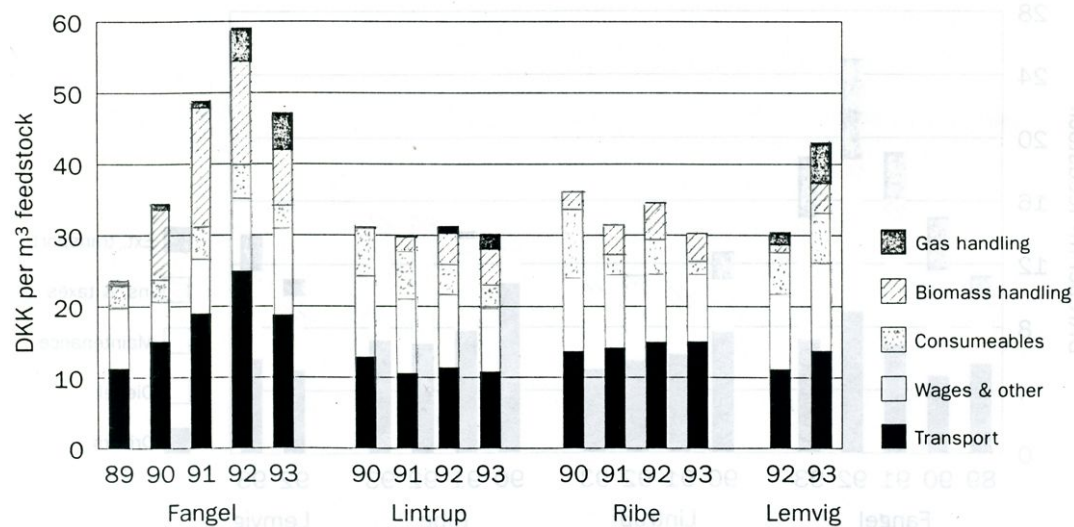


図 2-8 主要 4 プラントにおける原料 1 m³ あたりの支出 <sup>27)</sup>

これらのプラント成立の鍵はバイオガス発生量である。バイオガス発生量の半分程度が有機廃棄物によるものと思われるが、その入手が、金額的にも、量的にも、質的にも不安定なことに問題があると彼らは認識している。より安定的に入手できる有機物として、地域の家庭ごみに目を向けているプラントも既にあった。

ドイツでもデンマークと同様、家畜糞尿処理にメタン発酵を用いながら、他の有機物を加えてバイオガス発生量を増加させ、その運営を経済的に可能とさせるプロセスが普及し始めていた。

1992 年に設立されたバイオガス組合 <sup>28)</sup> は、組合員に農家、コンサルタント、メーカー、研究所などから構成され、そのようなバイオガス事業を育てており、2003 年には 1100 の会員数を数え、18 地域の組織体から構成されるに至っている。湿式メタン発酵処理はその間に技術的にも事業的にも完成されたといえる。施設の数 は 前述のように 1992 年に 140 箇所、1998 年には 620 箇所、2002 年に



は 1,900 箇所、更に 2005 年には 2,700 箇所となっており、総発電出力は 650MW でドイツの国内総発電出力の 1%を占めるに至っている。

このような急成長を促したのは、再生エネルギー法<sup>29)</sup>を始めとする施策であるが、それを支える技術的な発展も見逃せない。固形有機物を混入させるときの問題点は、その移送や発酵槽内でのスカム発生、消化残渣の脱水などに従来と異なる点があり、さらに改善が望まれていたのは、バイオガスからの脱硫、貯蔵、発電施設などである。これらが、費用の増大化をもたらすことなく、適切な方法で解決されることが望まれていた。

それまでの原料の性状はせいぜい 5%程度の濃度の汚泥であったが、固形有機物を扱う場合は 10%濃度或いはそれ以上のものを送れなければならない。オープンインペラの渦巻ポンプからスクリー式のポンプ或いはスクリーコンベヤ、更にはピストン式のポンプと様々な機器が生み出されている。

汚泥消化でもスカムの発生はあるが、固形有機物を混合してメタン発酵すればそこには微生物分解困難な繊維物質が残り、スカムの発生が起きやすくなる。そこで発酵槽の攪拌にはスカム破碎の機能が求められる。安価で有効な方法として、攪拌装置を稼動式にして内部も表面も攪拌できるように工夫してきている。攪拌装置を旋回可能な軸受けでタンクを通した攪拌装置や昇降式の水の中攪拌装置などを開発している。

消化残渣の脱水は汚泥消化では遠心分離装置や真空脱水機でよかったが、固形物残渣の繊維状物質やその他の夾雑物が混じる汚泥では、スクリープレス式脱水やフィルタ式脱水により、まずそれら固形物残渣を除去して次に遠心脱水機などを使う場合もある。スクリープレスそのものは従来し尿中の残渣除去に使用されているが、用途が限られるため種類も乏しかった。固形有機物メタン発酵に利用される場合はより勾配は小さく、孔径も小さいものが無薬注脱水の場合選択される。家畜糞尿のメタン発酵では、脱水したところで同じ農地に還元されるため、脱水せずにそのまま農地に散布する。散布する機械もそのような残渣では閉塞しないようになっている。

メタン発酵ではたんぱく質の分解の結果、硫化水素が発生しバイオガスに含まれる。バイオガスを燃料等として利用するとき、硫化水素は腐食環境を助長するため除去が必要である。硫化水素の除去は従来酸化鉄粒子の充填された脱硫塔で除去されていたが、費用がかかる。1986 年ラインハルト・ヘニング<sup>30)</sup>が発表した方法であるが、数%の空気をバイオガスに混合することで、硫化水素を酸化して固体硫黄にして除去する方法が確立された。これで、特別な薬品を使わずに済み、廃棄物も発生させないで済むようになり、バイオガス利用の事業性は大きく改善されることになった。

バイオガスを燃料等として利用するには一旦貯蔵が必要である。従来はコンクリート水槽に水を張って、これに鋼板製タンクを被せて捕集していた。しかし近年ガスバリア性の高いプラスチック膜が開発され、それを発酵槽の上にフイルム状に被せてバイオガスを蓄えたり、そのような樹脂をラミネートした樹脂膜をバルーン状や蛇腹状の袋に加工しバイオガスを蓄えることができるようになった。耐久データに乏しい点など問題もあるが、形状や設置場所が自由に選べ、特に小型のプラントでは多く利用されるようになった。

ドイツの家畜糞尿メタン発酵の事業性を支えるのは、バイオガスによる売電収入である。発電機は発電効率が高く、かつ経済的なものでなければならない。駆動部分が多く、損耗パーツを多く持つエンジンは従来発電機メーカーがその維持管理をおこなっており、発電収益の大分をメンテナンス費にもってゆかれることが多かった。ドイツではそこを農場主自らがエンジンや発電機の消耗品交換を行って経費削減に努めている。ガスエンジン発電機そのものの効率向上とメンテナンスに関するメーカーの協力がその良好な関係を支えている。

このようなハード面でのシステム向上と維持管理に対する農家のやる気は、事業性が見えるから維持されている。

図 2-9 に示される Johannesburg のプラント<sup>31)</sup> について考察してみる。

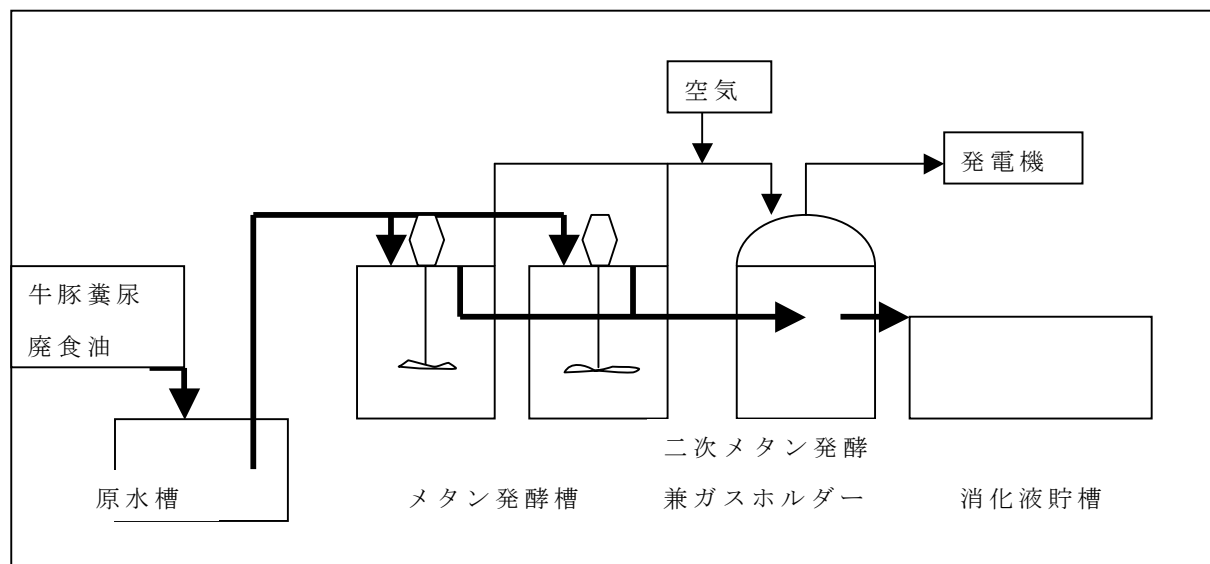


図 2-9 Johannesburg メタン発酵プラント フローシート

Johannesburg のプラントは 25 軒の農家の家畜糞尿 30,000t/年と廃食油 10,000t/年の合計 40,000t/年（110t/日）の処理能力を持つ施設として建設されている。

原料にあつては、廃食油は 12.5 ユーロ/t で購入しているが、散布農地のな

い豚糞尿持ち込み農家からは処理費を 6 ユーロ / t とっている。それぞれ 10,000 t / 年程度あるとする。

バイオガスの発生量は 90 m<sup>3</sup> / t あるとすると、年間 3,600,000 m<sup>3</sup> 発生する。このうち 1 割を自己消費して 3,240,000 m<sup>3</sup> 分が売電にまわせる。1 m<sup>3</sup> バイオガスで 1.7 kWh の発電ができるとすると、年間売電力量は 5,508 MWh となる。ドイツでは再生エネルギー法を受けて、再生可能エネルギーの電力は 10.2 セント ユーロ / kWh となっているため、電力収入は 561,816 ユーロ / 年となる。

施設の建設費は 250 万ユーロで、二名（人件費 7 万ユーロ / 年）で運転した場合、施設の単純償却年数は以下の表 2-3 のように計算できる。

表 2-3 Johannesburg メタン発酵プラント償却年数計算

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| 収入                  |                                    |
| 糞尿処理費               | 10,000t/年 × 6 = 60,000 ユーロ / 年     |
| 売電力                 | 561,816 ユーロ / 年                    |
| 合計                  | 621,816 ユーロ / 年                    |
| 支出                  |                                    |
| 廃食油購入               | 10,000t/年 × 12.5 = 125,000 ユーロ / 年 |
| 人件費                 | 70,000 ユーロ / 年                     |
| 施設補修費（建設費の 1 % / 年） | 25,000 ユーロ / 年                     |
| 合計                  | 220,000 ユーロ / 年                    |
| 年間収益                | 401,816 ユーロ / 年                    |
| 建設費                 | 2,500,000 ユーロ                      |
| 建設費償却年数             | 6.2 年                              |

通常の工業製品製造などでの投資で考えると、やや物足りないが、農業施設一般における事業性からすると、可能な事業と言えるであろう。そのため、前述のように再生エネルギー法成立以後、家畜糞尿施設数は大幅に伸びている。

#### 2.2.4 乾式メタン発酵

乾式メタン発酵処理は家畜糞尿メタン発酵処理で、農業残渣や廃食油を入れたメタン発酵処理が始まった直後に、実験的施設は各地でスタートしている。

欧州では固形有機ごみーバイオウエイストーは埋立て処分するかコンポスト利用するのが一般的な処理方法であるが、いずれも問題がある。埋立てすれば有機物はメタン発酵してメタンを大気に放出させ、温室効果ガスとなる。一方

The diagram illustrates the organic waste management process at QWS, starting with pretreated biowaste entering a 200 m³ dosing unit. This feeds into a 2450 m³ DRANCO digester, which also receives heat and steam. Biogas from the digester is sent to a flare or gas storage, which then feeds into gas engines and generators to produce electricity. Waste heat from the engines is used in a steam generator. The digester's output goes to a 20 m³ buffer tank, then through a mixing unit and a press. The press produces press cake, which goes to aerobic maturation (resulting in HUMOTEX) and a centrifuge. The centrifuge separates concentrate (sent to the steam generator) from centrifuge cake (sent to aerobic maturation). The centrifuge also receives polymer solution. The effluent from the centrifuge goes to a 200 m³ buffer tank, then to an evaporator. The evaporator's steam goes to a scrubber, which also receives H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The scrubber's output goes to a biofilter, which produces cleaned air and recycles steam to pump. The biofilter also receives polluted air. The steam generator also receives waste heat and produces steam for the digester and evaporator, and condensate for the steam generator.

```

graph TD
    PBW[pretreated biowaste] --> DU[DOSING UNIT 200 m³]
    H[heat] --> DD[DRANCO DIGESTER 2450 m³]
    S[steam] --> DD
    DD -- biogas --> F[FLARE]
    DD -- biogas --> GS[GAS STORAGE]
    GS --> GEG[GAS ENGINES + GENERATORS]
    LG[landfill gas] --> GEG
    GEG -- electricity --> E[electricity]
    GEG -- waste heat --> SG[STEAM GENERATOR]
    DD --> B1[BUFFER 20 m³]
    B1 --> MU[MIXING UNIT]
    MU --> P[PRESS]
    P -- polymer solution --> B1
    P -- press cake --> AM[AEROBIC MATURATION]
    AM --> HUMOTEX[HUMOTEX]
    P --> B2[BUFFER PRESS WATER]
    B2 --> C[CENTRIFUGE]
    C -- polymer solution --> B2
    C -- concentrate --> SG
    C -- centrifuge cake --> AM
    C --> B3[BUFFER EFFLUENT 200 m³]
    B3 --> EV[EVAPORATOR]
    SG -- steam --> EV
    EV -- condensate --> SG
    EV -- steam --> SCR[SCRUBBER]
    H2SO4[H2SO4] --> SCR
    SCR -- steam --> BIF[BIOFILTER]
    SCR -- steam to pump --> BIF
    BIF -- cleaned air --> CA[cleaned air]
    BIF -- polluted air --> BIF
  
```

**QWS** QUALITY WASTE SYSTEMS  
Organic Waste Systems

[http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/anaerobic\\_digestion\\_biogas/07bm\\_073\\_93.pdf](http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/anaerobic_digestion_biogas/07bm_073_93.pdf)

紙ごみは特異な性質がある。紙は有機物の産物でありながら、バイオウエイストと認められず、コンポスト原料とならない。かつて、新聞インクや色インクには PCB などの問題を抱えたことも理由の一つであるが、コンポスト化にお

いて、紙は分解がむずかしい点も紙ごみがバイオウエイストとならない理由でもある。分解しない紙が農地にあると、その農産物の信用も失いかねない。このようなことから、紙はバイオウエイストに入れないがバイオマスには違いない。都市によっては紙ごみを「グレーウエイスト」という分類に入れる場合もある。分別収集の基準は異なるが、バイオウエイストとプラスチックを除いたごみは「グレーウエイスト」という分類にする場合、その中心は紙ごみとなる。

DRANCO は初めての商用プラントから紙ごみも発酵対象にしている<sup>33)</sup>。乾式メタン発酵残渣もコンポストとして利用される以上、紙ごみを原料とすることは農業側で障害や抵抗があったと予想される。高温メタン発酵では紙ごみのかなりの部分を分解することができるが、やはり繊維状物質は残る。農業利用できない場合は埋立ての前処理として利用されている。それでもバイオガス発生量は多いのでエネルギー便益だけでも十分な利益が得られる。また、DRANCO の発酵槽は縦型で内部に攪拌機構を持たない。機械的トラブルが回避できる代わりにショートパスが生じやすい。粘度が小さくなるとショートパスし易いが、紙ごみが入ることでそれを防げる。又、高濃度の有機物原料の場合、タンパク質起因のアンモニア濃度が発酵槽内で高く、発酵阻害が起こりやすいが、紙ごみ原料はその濃度を抑える。バイオガスに転換する有機物濃度にくらべ窒素濃度が低く、アンモニア発生濃度を低く抑えることができる。

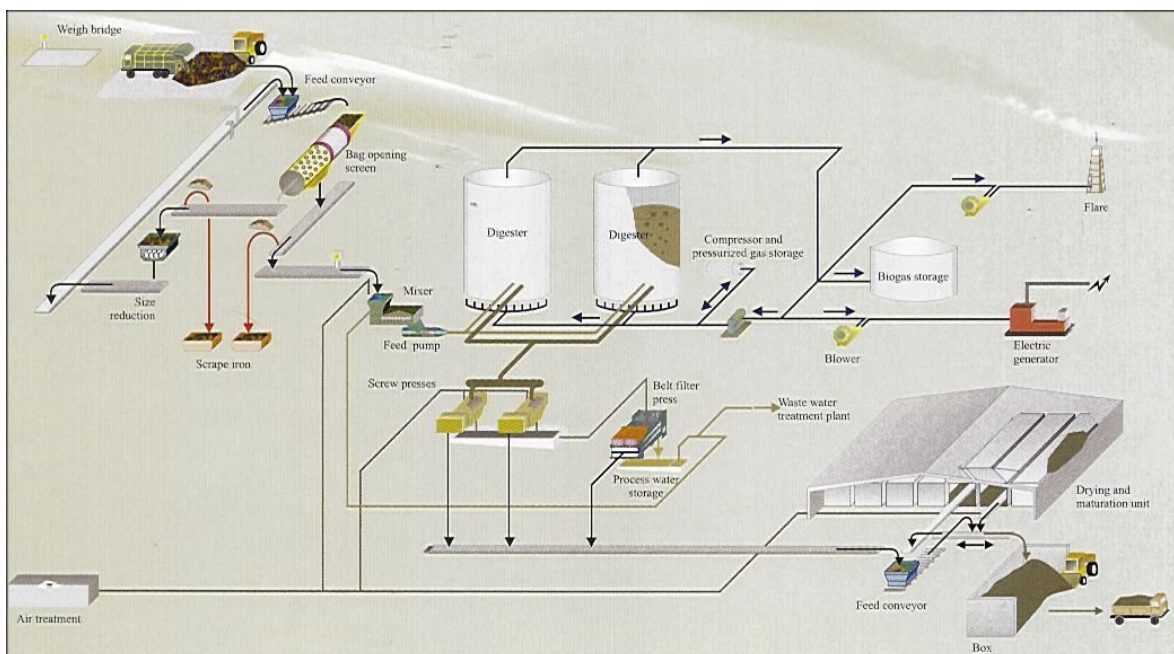


図 2-11 VALORGA プロセス例<sup>34)</sup>

<http://anaerobicsystems.com/engelski.htm>

VALORGA は先に述べたように 1987 年の実用プラントに先立ち、1982 年フランスで 5m<sup>3</sup> メタン発酵槽の実験をスタートさせている。その後 2000 年前後に 6 プラント<sup>35)</sup>を建設し、最も有力な乾式メタン発酵プラントメーカーとなった(図 2-11 参照)<sup>1)</sup>。プラントは円筒縦型の発酵槽で機械的攪拌のかわりにバイオガス攪拌が使われる。内容物は粘度の高い固形物混じりのスラリーであるため、高圧力でガスを吹き込むことになり、耐食性の圧縮機や数多くの高圧ガスのノズルが必要となる。又ガス攪拌ではスカム生成が避けられない。このため、原料に対する前処理異物除去施設は他の方式と違い、乾式のメタン発酵としては徹底した異物除去の施設を設けている。発酵は中温で行っている。1987 年フランス Amiens のプラントは 93,000t/年(約 250 t/日)の家庭ごみをメタン発酵で処理する最初の本格的なプラントであった。それ以降、都市ごみ、分別生ごみ、紙混合バイオウエイストなどの原料についてメタン発酵処理する 13 のプラントが VALORGA により建設されている。

KOMPOGAS は高温発酵で、横型プラグフロー(押し出し流れ式)メタン発酵槽を特徴としている(図 2-12 参照)<sup>36)</sup>。発酵槽の内部には攪拌材が入っており、基質の攪拌と発生するバイオガス上部に抜く役割を担うとともにスカム層の生成を緩和する。基質の濃度を高く維持することが、発酵槽内に沈殿物やスカムを残さず、これらを基質の排出にともなって引きずり出すことに成功している。基質濃度の薄い湿式のメタン発酵では沈殿物とスカムが生じやすい。このため原料の前処理を厳重に行う傾向があるが、所詮固形有機物を入れる以上その形を形成する繊維質物(スカム生成物質)の流入を阻止することは出来ない。KOMPOGAS 発酵槽も基質濃度が薄くなると同じ問題が発生する。基質の種類によってはたんぱく質濃度の高いものが原料となることもある。たんぱく質濃度の低い植物原料で薄められればよいが、そうでない場合は水や窒素分を除去した発酵残渣濾液で薄めてやる必要がある。高温発酵の場合アンモニアイオン濃度は 2500~3000ppm 以下に保ちたい。その結果、発酵槽内基質濃度が下がってしまうこともある。原料が選べる場合は、剪定枝や紙ごみの添加はこれらの問題を解決する有力な手法となる。

KOMPOGAS の強調する特徴は、バイオガスの利用と発酵残渣の利用にある。もともと KOMPOGAS の名称もコンポスト・ガスの造語であり、消化液残渣は熟成コンポストとして利用できることを特徴としていた。従って原料もコンポスト製造用の原料と同じで、剪定枝を多く含む厨芥や食品ごみの場合が多い。建設されたほとんどのプラントは実際、その残渣をコンポストとして近隣農家に配布している。もう一つの特徴は余剰バイオガスについては、CO<sub>2</sub> を除去して CNG 自動車の燃料として使っていることである。ただ、それを行っているのは、自



己所有のプラントの場合が多い。現状では高圧ガスの供給システムのコスト高で採算性はあまり良くないためであろうと思われる。

KOMPOGAS は 1980 年代後半実験プラントでの試行錯誤を行った後、最初のプラントを 1991 年 Rumlang に 8,500 t / 年のプラント、Bachenbulach に 8,000 t / 年のプラント、Otelfingen に 12,500 t / 年のプラント、と自己所有のプラントを建設し処理業を営み、運転しながら施設の改造と客先へのエンジニアリングを行ってきている。その結果、現在 30 箇所のプラントと建設中のもの 4 プラントをもち、乾式メタン発酵方式の中では最も多くの施設を建設している。<sup>37)</sup>

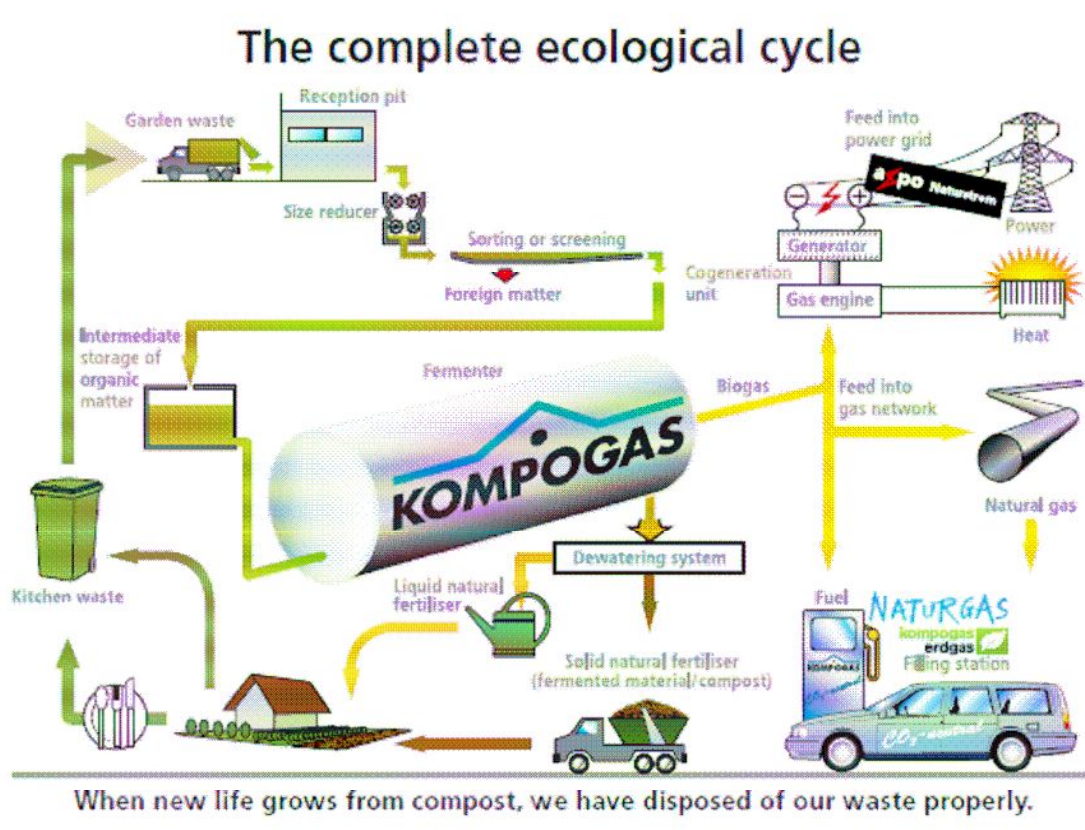


図 2-12 KOMPOGAS プロセス例<sup>36)</sup>

<http://www.kompogas.ch/en/Downloads/downloads.html>

乾式メタン発酵の経済性については種々検討されている。湿式に比べると建設費が高くなるが、売電力量なども大きくなり収入は増加する。しかし、それだけでは建設費の高騰分を賄うことはできないのが一般的である。処理手数料が得られるものとして、始めて事業計画の経済性が維持できることになる場合が多い。スイスの Oetwill am See のプラントは、地域のバイオウエイストを 30 t / 日有料で処理する施設で、経済性について表 2-4 の報告がある<sup>38)</sup>。

表 2-4 Oetwill am See の Kompogas プロセスでの収支バランス

| Treatment of Biowaste to / year                   | 10,000               | Remarks               | ¥ : ¥/CHF | 86.4               |
|---|----------------------|-----------------------|-----------|--------------------|
| <b>INVESTMENT</b>                                 |                      | <b>Interest 5 %</b>   |           |                    |
| Studies, Env. Report, Gov. Approval               | CHF 194,000          |                       |           | 16,761,600         |
| Civil works                                       | CHF 1,525,568        |                       |           | 131,809,075        |
| Reception, Preparation                            | CHF 969,000          |                       |           | 83,721,600         |
| Fermentation incl. Control                        | CHF 2,153,000        |                       |           | 186,019,200        |
| Maturation, Air treatment                         | CHF 747,000          |                       |           | 64,540,800         |
| Gas engine  | CHF 595,000          |                       |           | 51,408,000         |
| Access, Surroundung, Fence, Weigh-bridge          | CHF 1,280,000        |                       |           | 110,592,000        |
| <b>TOTAL INVESTMENT</b>                           | <b>CHF 7,463,568</b> |                       |           | <b>644,852,275</b> |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>Capital costs</b>                              |                      |                       |           | -                  |
| Land lease  | CHF 100,000          | 10'000 m2 x 10.00/a   |           | 8,640,000          |
| Studies, Civil works, Access                      | CHF 240,685          | Amortization 20 years |           | 20,795,213         |
| Electro-mechanical Process Inst.                  | CHF 430,062          | Amortization 15 years |           | 37,157,336         |
| <b>Total Capital costs</b>                        | <b>CHF 770,747</b>   |                       |           | <b>66,592,549</b>  |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>Maintenance</b>                                |                      |                       |           | -                  |
| Buildings   | CHF 28,056           | 1%                    |           | 2,424,011          |
| Electro-mechanical Process Inst.                  | CHF 116,070          | 3%                    |           | 10,028,448         |
| Gas engines                                       | CHF 47,600           | 8%                    |           | 4,112,640          |
| <b>Total Maintenance</b>                          | <b>CHF 191,726</b>   |                       |           | <b>16,565,099</b>  |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>Rolling stock</b>                              |                      |                       |           | -                  |
| Energy  | CHF 0                |                       |           | -                  |
| Fresh water, waste water                          | CHF 12,045           |                       |           | 1,040,688          |
| Lubricants, grease, cleanser                      | CHF 18,000           |                       |           | 1,555,200          |
| <b>Total Rolling stock</b>                        | <b>CHF 30,045</b>    |                       |           | <b>2,595,888</b>   |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>Utilization of products</b>                    |                      |                       |           | -                  |
| Compost (Transportation to Farmland)              | CHF 36,000           |                       |           | 3,110,400          |
| Preswater (Transportation to Farmland)            | CHF 45,000           |                       |           | 3,888,000          |
| Foreign matter                                    | CHF 18,000           |                       |           | 1,555,200          |
| <b>Total Utilization of products</b>              | <b>CHF 99,000</b>    |                       |           | <b>8,553,600</b>   |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>Administration, management</b>                 |                      |                       |           | -                  |
| Quality control                                   | CHF 4,350            |                       |           | 375,840            |
| Insurances  | CHF 6,000            |                       |           | 518,400            |
| Office management                                 | CHF 31,200           |                       |           | 2,695,680          |
| Staff ( 2 labours)                                | CHF 214,760          |                       |           | 18,555,264         |
| <b>Total administration, managment</b>            | <b>CHF 256,310</b>   |                       |           | <b>22,145,184</b>  |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>GROSS COSTS</b>                                | <b>CHF 1,347,828</b> |                       |           | <b>116,452,320</b> |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>SALES</b>                                      |                      |                       |           | -                  |
| Energy  | CHF 195,000          |                       |           | 16,848,000         |
| Compost   | CHF 20,000           |                       |           | 1,728,000          |
| <b>Total Sales</b>                                | <b>CHF 215,000</b>   |                       |           | <b>18,576,000</b>  |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>NET COSTS</b>                                  | <b>CHF 1,132,828</b> |                       |           | <b>97,876,320</b>  |
|   |                      |                       |           | -                  |
| <b>TREATMENT COSTS PER TON</b>                    | <b>CHF 113</b>       |                       |           | <b>9,788</b>       |
| 本施設での処理費収入(トンあたり)                                 | 142                  |                       |           | 12,269             |
| 本施設での処理費収入(全体)                                    | 1,420,000            |                       |           | 122,688,000        |
|   |                      |                       |           | -                  |
| 参考: 好気コンポストのときの処理料金(トンあたり)                        | 120                  |                       |           | 10,368             |
| 参考: 焼却法での処理費(トンあたり、推定)                            | 200                  |                       |           | 17,280             |
| 注: 上記資本コストの値は、均等で割ると、土建は12. 5年、機械は10.4年の計算となっている。 |                      |                       |           |                    |



本施設での運転は以下のように行われている<sup>39)</sup>。

処理規模： 10,000 t /年 (約 30 t /日)

原料： 市の収集する生ごみ；50%  
業者の収集する剪定枝及び食品廃棄物；50%

運転： 発酵槽は 24 h /日×365 日/年運転。前処理、脱水は昼間運転。  
運転員は昼間勤務の 2 名

電力： 発電 240kW (5,750 kWh/d)  
自己消費 50kW (1,200 kWh/d)  
余剰電力 190kW (4,560 kWh/d)

このような収支構造は表 2-3 でみたドイツ Johannesburg の湿式プラントの場合と比較してみるとその違いが明らかになる。表 2-5 にそれを示す。なお比較のため、1 ユーロ 135 円、1 スイスフラン 86.4 円で円に統一して記載する。

ドイツは再生エネルギー法により、バイオマス等からの発電電力を高く買入れる政策を実施して、その価格を 20 年約束することで、事業者の参入を可能とした。このため廃食用油を購入して原料にいれるなどして発電量を増加させる一方、建設費が安価となる湿式プロセスを採用して、家畜糞尿処理施設が多数建設された。この成功原因は、下記の 3 点がそろうことにある。①売電力単価が高い。②廃食用油のような安価でエネルギー量の高い原料が入手できる。③プラント建設費が低く、t/d 当り 300 万円を切る。

我国でもこれらの条件をクリアすることが可能であるか考えてみる。①電力単価は既に PFI 法により最高でも 11 円/kWh、普通 8 円/kWh で、これは如何ともしがたい状況にある。②の廃食用油は、地域によっては集まる可能性はある。③の建設費は我国では、施設規模が大きくても t/d 当り 300 万円は無理なのが一般的である。放流のための水処理を要求される場合が多く、メタン発酵だけのシステム例が少ないのも一因でもある。ただ建設費については補助金が支出される場合が多い。1/2 補助なら t/d 当り 600 万円でもよいことになり、大規模施設なら可能になってくる。このように考えると湿式プロセスは電力単価が変われば日本でも可能となるが、現在は困難な仕組みであることが分かる。表では電力単価が 8 円/kWh の場合も試算してみた。結果は、他の条件が全て揃っても建設費回収に 15 年以上要し、事業にはなり難いことが分かる。

尚、企業や自治体などの組織で、他の施設(24 時間稼動のものが望ましいが)への電力供給をメタン発酵発電で補い、これを組織内部で購入電力単価と評価できるなら、ドイツ並み以上の収入の計上も可能となり、適用範囲は広がる。

次にスイスの乾式プロセスについて考える。これが成功している原因はひと

えに処理費収入にある。処理 t あたり 12,270 円の収入が得られている。我国の状況では処理費についてはそのような金額は十分期待できる。しかし建設費がここでは t / d 当り 2,000 万円であるが、我国では放流水処理などが要求されるため、もっと高くなる。しかし前述のとおり 1/2 補助がつくなら、t / d 当り 4,000 万円でよいことになり、日本でも十分可能な仕組みであることが分かる。

表 2-5 湿式プロセスと乾式プロセスの経済性比較

| プロセス           | 湿式プロセス                   |           | 乾式プロセス                  |
|----------------|--------------------------|-----------|-------------------------|
| 国- 場所          | ドイツ Johannesburg         |           | スイス Oetwill am See      |
| 原料             | 家畜糞尿、廃食用油                |           | 生ごみ、剪定枝                 |
| 処理量            | 40,000 t / 年 (120 t / 日) |           | 10,000 t / 年 (30 t / 日) |
| 余剰電力           | 630kW                    |           | 190kW                   |
| 売電力単価          | 13.8 円 / kWh             | 8 円 / kWh | 10 円 / kWh              |
| 処理費収入 (円 / 年)  | 810 万                    | 同左        | 12,269 万                |
| 売電収入 (円 / 年)   | 7,585 万                  | 4,397 万   | 1,685 万                 |
| 運転収入合計 (円 / 年) | 8,395 万                  | 5,207 万   | 13,954 万                |
| 運転費支出計 (円 / 年) | 2,970 万                  | 同左        | 4,986 万                 |
| 運転収益 (円 / 年)   | 5,425 万                  | 2,237 万   | 8,968 万                 |
|                |                          |           |                         |
| 建設費            | 33,750 万円                | 同左        | 64,485 万円               |
| 建設費回収年数        | 6.2 年                    | 15.1 年    | 7.2 年                   |

## 2.3 我国での固形有機物メタン発酵

### 2.3.1 概要

我国での固形有機物メタン発酵では、技術導入が 10 年前から始まり、現在 50 箇所程度のプラントが建設されている。それらのプラントは 1/3 が実験用施設で、1/3 がし尿やごみといった自治体の建設した施設で、そして残りの 1/3 が食品廃棄物をメタン発酵する民間施設のものである。それら施設を湿式プロセスと乾式プロセスということで分けるなら、湿式プロセスが 90% 以上を占める。

我国におけるメタン発酵への固形有機物導入の端緒は、前述の 1990 年代に始まるエネルギー節約型し尿処理施設における「汚泥再生処理センター構想」<sup>40)</sup>であろう。1970 年にあったサンシャイン計画のなかにおいても、固形有機物の下水汚泥への添加が大量のバイオガスを産出することに注目されていたが、

商用施設建設までには至らなかった。

「汚泥再生処理センター構想」は、し尿処理工程に地域の生ごみを取り込むことでエネルギー消費の少ないプラントを求めたもので、1997年補助要項となり各地に広がった。しかし実際のプロセス採用にあっては実証試験を経ることが義務づけられているため、技術方式ごとに実証試験プラントが建設運転された。それらは、CITEC社のWASSAプロセスやBIMA式発酵槽と組み合わされた湿式プロセスで、し尿汚泥のメタン発酵を主目的とするものであった。

この時期を同じくして、乾式メタン発酵プロセスも我国に導入された。KOMPOGASプロセスとDRANCOプロセスである。いずれも押し出し流れの高温発酵プロセスである。発酵槽が横型か縦型かが大きな違いとなる。原料は生ごみや剪定枝、紙ごみなどとなるため、自治体ではごみ処理施設、民間では産業廃棄物処理施設の一部として利用され得る。これらの導入にあたっては当時は補助の仕組みが無かったため、まずはごみ処理施設としてメタン発酵が認証される政策状況作りからスタートした。2000年には食品リサイクル法ができ、メタン発酵は食品廃棄物のリサイクルの手法として認められ、2001年にはごみ処理施設と認証され、2005年にはごみ処理のなかで一般的な焼却施設よりも高い補助率（1/2）が適用されるようになった。我国で最初の商用施設で乾式プロセスが採用されたのは2003年に建設されたカンポバイオリサイクル施設で食品リサイクル法の補助を得て京都府に建設されている。

我国における固形有機物メタン発酵は未だスタート地点から離陸できずにいる。固形有機物メタン発酵の原料はどうしても廃棄物系有機物となるが、我国の一般廃棄物（年間5,000万t）はその97%が何らかの処理を既に実施されており、うち8割は焼却されているという、高度廃棄物管理社会である<sup>41)</sup>。

このような状況でメタン発酵による廃棄物処理を進めてゆくには、既に社会システムが高度に完成したなかでの、ある意味パラダイム転換を要求することになる。ここではそれぞれの分野において固形有機物メタン発酵はどのように扱われつつあるかを記述する。

### 2.3.2 下水汚泥消化

下水汚泥のメタン発酵施設は、国内では最も歴史が古く、技術の蓄積も多い。下水道施設は国民に必要なインフラとしての認識も高く、潤沢な予算の下で長期の整備計画が立てられ施設が建設されてきている。しかし、従来の一直線的な人口増はなくなり、長期計画も修正を余儀なくされている箇所も多く、施設負荷に余裕のあるところも多い。

2002年国土交通省は「バイオソリッド利用活用基本計画」<sup>42)</sup>を作成して、下水道施設が他の汚水処理施設（農業集落排水施設や合併処理浄化槽など）と

共同で使用されることや、下水汚泥に他の有機物例えば生ごみを入れて発電量を増やすことで処理場使用電力を半分にする、或いはバイオガスの発電と熱供給をPFI事業で行うといった計画を進めることとした。

実際 2005 年には石川県珠洲市で、下水汚泥に生ごみ、し尿浄化槽汚泥、農村集落排水汚泥を入れてメタン発酵してエネルギー回収を行う「珠洲市バイオマスイエネギー推進プラン」<sup>43)</sup>が始まっている。

下水汚泥用のメタン発酵槽は汚泥が対象であるため、固形有機物をそのまま入れるのは困難がある。Baden-Baden 市のようにハイドロパルパーや脱水機などを使って固形有機物中の有機物部分を液状で取り出してこれを発酵槽に添加することにより可能となる。このような若干の施設の追加だけで飛躍的なバイオガスの増量が可能となるので、将来的な可能性は高い。

### 2.3.3 し尿処理

し尿処理では前述のように、固形有機物を加えたし尿・汚泥メタン発酵処理の「汚泥再生処理センター構想」がスタートしている。これに基づいて 1999 年から 2005 年にかけて表 2-6<sup>44)</sup>に示されるような 10 数箇所の固形有機物添加メタン発酵施設が建設されたが、近年は少なくなっている。し尿汚泥の資源化定義について、何らかの有効利用計画が示されればよいということになったため、簡単なコンポスト化施設を付帯させるだけで済ませるところが多くなった。結局政策のバックアップがなくなってくると、金額的負担が前面に表れ、コスト負担の少ない方法へと流れる。

当時採用されたメタン発酵方式は、Wassa プロセスを利用したメビウスグループ、Beema 発酵槽を利用したレムグループのものが商用プラントとして建設されている。Schwarting-Uhde プロセスを利用したリネッサグループもあるが、実証試験を実施したままで、商用プラント建設に至っていない。

いずれのプロセスも、し尿汚泥と固形有機物（地域の生ごみなど）を混合メタン発酵して回収電力を増加させて、し尿処理本体の電力消費量の軽減をはかるものである。

元来このプラントはドイツの家畜糞尿処理での固形有機物メタン発酵の転用であるので、コストも低く経済効果の大きい筈であった。しかしここでは公共施設であるため、個人農家が自家用のコンポストを製造するのとは違い、全てに完全を求められる前提でプラント構成を行わねばならず、経済効果を出すほどの建設費で建設するのには困難があった。プラントとしては固形有機物の受入れ、可溶化の前処理、その他消化残渣のコンポスト化を計る関係上、異物の除去にも十分な対策が必要で、コストの割にはメリットが少ない感があった。

表 2-6 汚泥再生処理センターメタン発酵施設一覧<sup>44)</sup>

| 設 置 場<br>所 | 事業主体             | 運 転 開<br>始 年 | 計 画 処 理 量                 | 副 産 物 利 用          |
|------------|------------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| 北海道        | 南宗谷衛生施設組合        | 2002 年       | し尿等 15t/d 生<br>生ごみ 16t/d  | 残渣：堆肥化<br>消化液：脱窒処理 |
| 北海道        | 西天北五町衛生施設<br>組合  | 2002 年       | し尿等 20t/d<br>生ごみ 8t/d     |                    |
| 宮城県        | 大崎地区広域行政事<br>務組合 | 2002 年       | し尿等 105t/d 生<br>ごみ 1t/d   |                    |
| 新潟県        | 東蒲原広域衛生組合        | 1999 年       | し尿等 22.3t/d<br>生ごみ 3.5t/d |                    |
| 新潟県        | 新潟地区広域事務組<br>合   | 2003 年       | し尿等 149t/d<br>生ごみ 1.8t/d  | 残渣：コンポスト           |
| 新潟県        | 上越市              | 1999 年       | し尿等 240t/d<br>生ごみ 8t/d    | 残渣：堆肥化             |
| 長野県        | 下伊那郡西部衛生施<br>設組合 | 1999 年       | し尿等 16t/d<br>生ごみ 8t/d     |                    |
| 長野県        | 浅麓環境施設組合         | 2005 年       | し尿等 156t/d<br>生ごみ 19t/d   |                    |
| 愛知県        | 西春日井郡東部衛生<br>組合  | 2004 年       | し尿等 149t/d<br>生ごみ 7.1t/d  |                    |
| 奈良県        | 奈良市              | 2001 年       | し尿等 90t/d<br>生ごみ 3.4t/d   | 残渣：乾燥、堆肥化          |
| 奈良県        | 生駒市              | 2000 年       | し尿等 80t/d<br>生ごみ 1.3t/d   | 残渣：堆肥化             |
| 長崎県        | 上五島地域広域町村<br>圏組合 | 2002 年       | し尿等 69t/d<br>生ごみ 3t/d     |                    |
| 宮崎県        | 串間市              | 2000 年       | し尿等 35t/d<br>生ごみ 0.9t/d   |                    |

注) NEDO バイオマスエネルギー導入ガイドブック第2版(2005)編集

#### 2.3.4 家畜ふん尿処理

ドイツでは民間が事業として家畜糞尿に固形有機物を加えて、経済的かつエ

エネルギー的に独立したプラントを作っているが、我国ではまだ公共が試験などを実施しているという段階にとどまる。我国では事業として廃棄有機物と家畜糞尿のメタン発酵が事業として成立するのが困難であることは前節で述べたところであるが、そのことは、下記に示す表 2-7<sup>45)</sup> の固形有機物混合家畜糞尿メタン発酵施設一覧からも分かる。1 箇所は民間の牧場で実施されているが、それ以外は県の実証試験と自治体主導で建設されたものである。

表に示された施設では消化液を液肥として利用している場合が多いが、我国では液肥の利用は未だ少なく理解が得られていない場合が多い。しかし、家畜糞尿の有効利用を考えると、この液分の利用は必ず必要となる。牧草地を持たない農場が多いと、液肥の散布場所がないのが問題となるが、我国には稲作がある。肥料成分は液状で給水ラインに入れることが出来るため田圃での散布は有利である。稲作での消化液利用の研究は近年開始された。

表に示された施設の多くは発電を行っている。ただ、その量はドイツで経済性を追求するため 90kWh/原料 t に対し、ここでは大体 40kWh/原料 t 程度の発電である。デンマークの場合に近い。廃食用油のような高カロリーの原料が少ないことと、我国では発電メリットが少ないことがその理由であろう。

表 2-7 固形有機物混合家畜糞尿メタン発酵施設一覧 <sup>45)</sup>

| 設 置 場 所 | 事業主体   | 運 転 開<br>始 年 | 計 画 処 理 量 と 発 電                         | 副 産 物 利 用 |
|---------|--------|--------------|---|-----------|
| 青森県     | 青森県・試験 | 2004 年       | 乳牛糞尿 2.7t/d 野<br>菜屑 0.72t/d<br>発電 9.8kW | 消化液：液肥    |
| 岩手県     | 葛巻町    | 2003 年       | 乳牛糞尿 13t/d<br>生ごみ 1t/d<br>発電 37kW       | 消化液：液肥    |
| 山梨県     | 上九一色村  | 2004 年       | 家畜糞尿、藁類<br>38t/d<br>発電 55kW             | 消化液：液肥    |
| 静岡県     | 静岡県・試験 | 2005 年       | 家畜糞尿、食品廃<br>棄物 3.39t/d<br>発電 30kW       | 消化液：液肥    |

|     |         |        |  |                              |
|-----|---------|--------|--|------------------------------|
| 京都府 | 八木町     | 1998 年 | 家畜糞尿、廃牛乳<br>おから等 83.3t/d<br>発電 220kW               | 消化液：液肥利用<br>及び脱窒処理<br>残渣：堆肥化 |
| 奈良県 | 奈良県・試験  | 2005 年 | 家畜糞尿、草、剪<br>定枝、籾殻、残飯<br>発電：施設電灯                    | 残渣：堆肥化                       |
| 岡山県 | 岡山県・試験  | 2005 年 | 豚糞尿 2.7t/d<br>生ごみ 0.3t/d<br>発電：施設内利用               | 残渣：堆肥化<br>消化液：浄化处理           |
| 熊本県 | 山鹿市     | 2005 年 | 家畜糞尿 74.1 t/d<br>集排汚泥 2t/d<br>生ごみ 3t/d<br>発電 200kW | 消化液：液肥<br>残渣：堆肥化             |
| 大分県 | 日田市     | 2005 年 | 豚糞尿 50t/d<br>生ごみ 24t/d<br>発電 170kW                 | 消化液：液肥                       |
| 宮崎県 | 有）高千穂牧場 | 2004 年 | 家畜糞尿 5.2t/d 食<br>品廃棄物 0.8t/d<br>発電 30kW            | 消化液：液肥                       |

注）NEDO バイオマスエネルギー導入ガイドブック第2版（2005）編集

### 2.3.5 生ごみ・食品等廃棄物メタン発酵

我国における固形有機物のメタン発酵は、自治体のごみ処理での採用、民間の食品リサイクル法関係での廃棄物処理での採用、食品工場の廃棄物ゼロ運動での工場内施設、NEDOの実証施設として建設されたものなどとなっている。

表 2-8<sup>44)</sup> にその一覧を示す。

表 2-8 生ごみ・食品等廃棄物メタン発酵施設一覧<sup>44)</sup>

| 設 置 場<br>所 | 事業主体               | 運 転 開<br>始年 | 計画処理量と発電<br>等エネルギー利用 | 副産物利用                      |
|------------|--------------------|-------------|----------------------|----------------------------|
| 北海道        | 北空知衛生組合<br>(深川市ほか) | 2003 年      | 生ごみ 16t/d<br>発電 94kW | 消化液：下水<br>残渣：汚泥再生セ<br>ンターへ |

|      |                    |        |                                      |                         |
|------|--------------------|--------|--------------------------------------|-------------------------|
| 北海道  | 砂川地区保険衛生組合（砂川市ほか）  | 2003 年 | 生ごみ 22t/d<br>発電 112kW                | 消化液：下水<br>残渣：堆肥化        |
| 北海道  | 中空知衛生施設組合（滝川市ほか）   | 2003 年 | 生ごみ 55t/d<br>発電 400kW<br>余熱ロードヒーティング | 消化液：脱窒・高度処理放流<br>残渣：堆肥化 |
| 宮城県  | 株）シルビア             | 2004 年 | 下水汚泥、食品廃棄物 40t/d<br>発電 130kW         | 消化液：液肥<br>残渣：堆肥化        |
| 宮城県  | 白石市・実証             | 2003 年 | 生ごみ 3t/d<br>発電 22.3kW                | 残渣：堆肥化<br>後日焼却に変更       |
| 埼玉県  | 宮代町産学官研究会          | 2003 年 | 農作物廃棄物<br>発電：1kW                     | 残渣：堆肥化<br>消化液：液肥        |
| 埼玉県  | 協同商事・実証            | 2002 年 | 食品廃棄物 0.5t/d<br>バイオガス：熱利用            | 消化液：再利用<br>残渣：分離乾燥化     |
| 千葉県  | エナジェン・実証           | 2005 年 | 食品廃棄物 20t/d<br>バイオガス：ハウス栽培熱利用        |                         |
| 千葉県  | ジャパンリサイクル（株）       | 2003 年 | 食品廃棄物・汚泥・廃油 30t/d<br>バイオガス：溶融炉       | 残渣：溶融炉<br>消化液：処理放流      |
| 千葉県  | キッコーマン（株）・実証       | 2005 年 | 醤油ケーキ 1t/d<br>発電 22kW                |                         |
| 千葉県  | フジコー               | 2004 年 | 生ごみ、動植物残渣 15t/d 発電 143kW             | 残渣：堆肥化                  |
| 神奈川県 | 横須賀市<br>住友重機械工業（株） | 2002 年 | 生ごみ 1t/d                             |                         |
| 神奈川県 | 明治乳業・富士電機システムズ・実証  | 2005 年 | 廃牛乳・廃ヨーグルト 2t/d<br>バイオガス：熱利用         |                         |
| 神奈川県 | 東京ガス（株）・実証         | 2002 年 | 昆布・アオサ 1t/d<br>発電 9.8kW              |                         |
| 東京都  | バイオエナジー            | 2006 年 | 食品残渣 110t/d<br>発電 1000kW             |                         |



|          |                          |        |                                 |                              |
|----------|--------------------------|--------|---------------------------------|------------------------------|
| 富山県      | 富山グリーンフード<br>リサイクル（株）    | 2003 年 | 食品残渣 24.4t/d<br>発電 90kW         | 残渣：堆肥化<br>消化液：処理放流<br>及び液肥利用 |
| 長野県      | （株）ポテトデリカ                | 2003 年 | ポテト皮 5.2t/d<br>発電 30kW          | 消化液：処理放流                     |
| 静岡県      | 光陽産業、静岡ガス、<br>石川島芝浦機械・実証 | 2005 年 | 食品残渣 0.2t/d<br>燃料電池 1kW         |                              |
| 愛知県      | コカコーラセントラ<br>ルジャパン・実証    | 2004 年 | コーヒー粕 9.6t/d<br>発電 6kW          |                              |
| 三重県      | 井村屋製菓                    | 2002 年 | 食品残渣 2t/d<br>発電                 | 残渣：堆肥化                       |
| 京都府      | バイオガス研究会                 | 1999 年 | 食品残渣 3t/d<br>発電 22kW            | 残渣：焼却・堆肥<br>化、消化液：下水<br>放流   |
| 京都府      | カンポリサイクルプ<br>ラザ          | 2004 年 | 食品残渣 50t/d<br>発電 600kW          | 残渣：堆肥化・焼<br>却、消化液：処理<br>再利用  |
| 大阪府      | 関紀産業                     | 1985 年 | 食品残渣 5t/d<br>発電：場内利用            | 残渣：堆肥化<br>消化液：処理後放<br>流      |
| 兵庫県      | コープ神戸                    | 2003 年 | 食品残渣 5t/d<br>汚泥 1t/d<br>発電：60kW | 残渣：可溶化再利<br>用<br>消化液：処理      |
| 兵庫県      | マイカル明石                   | 1997 年 | 食品残渣 1t/d<br>熱利用                | 残渣、消化液：処<br>理                |
| 兵庫県      | 水瀬製皮所・実証                 | 2003 年 | 皮残渣 4.83t/d<br>発電 20kW          |                              |
| 熊本県      | 九州産廃                     | 2005 年 | 食品残渣等 160t/d<br>発電 800kW        | 残渣：堆肥化<br>消化液：処理放流           |
| 宮崎県      | 霧島リサイクル協同<br>組合          | 2003 年 | 焼酎粕 300t/d<br>熱利用               | 残渣：飼料化                       |
| 鹿児島<br>県 | サザングリーン協<br>同組合          | 2002 年 | 焼酎廃液 700 t / d                  | 残渣：堆肥化<br>消化液：処理放流           |

|      |            |         |                                    |             |
|------|------------|---------|------------------------------------|-------------|
| 鹿児島県 | 屋久島町、鹿児島大学 | 2001～5年 | 豚ふん、紙ごみ、生ごみ 665kg/d<br>発電 14kW     | 残渣：堆肥化および炭化 |
| 沖縄県  | 比嘉酒造・NEDO  | 2003年   | 泡盛蒸留粕 8t/d<br>米洗水 10t/d<br>発電 10kW |             |

注) NEDO バイオマスエネルギー導入ガイドブック第2版(2005)編集

本表以外にも小さな企業レベルでのメタン発酵プラントはいくつかある模様ではあるが、ここで掲載しただけでも30を超えるプラントがあることになり、家畜糞尿処理との混合プラントよりも多い。欧州では、特にドイツ、デンマークなどでは圧倒的に家畜糞尿プラントへの混合処理であるのに比べて、かなり事情が異なる。

事業主体が企業の場合、この事業が収益に寄与するものでなければならない。逆に言えば収益に寄与すると判断されるなら直ぐに採用される。自社工場での廃棄物処理として固形有機物処理を行うなら、その評価を、外部廃棄物処理業者へ委託するときの費用と比べて事業性を考える。廃棄物処理業では土地代、建設費、運営費、利益が乗って処理単価が出来るため、企業が内部処理を考えるより高くなりがちである。ただ、単一工場の場合、廃棄物処理業に比べて処理量が少ないのが一般的で、その分人件費や建設費は高くなるものの、それでもまだ外部委託より良いのかもしれない。表2-8においても、廃棄物処理業として実施されている処理量は40、32、15、110、24、50、100t/dであるのに対し、工場内施設となるものは、1、2、1、9.6、2、5、5、1t/dとなり、施設規模が小さくなる傾向にありながらも建設されている。

この他に組合方式がある。零細な事業者がまとまって大きな施設として実施するもので、焼酎組合の300、700t/dがある。理想的な事業運営形態はこの組合方式となるのであろうが、組合員の意見集約、利害衝突の仲裁など組合運営そのものが困難な場合が多く、なかなか事業として実施にいたらない場合が多い。この焼酎組合の場合、海洋投棄全面禁止という緊急事態が発生したため、組合事業が可能になっている。

## 2.4 まとめ

固形有機物のメタン発酵については、この10年間で大きくその様子は変わってきている。今の状況は、欧州で発達した固形有機物に関するメタン発酵技術が欧州の中でも発展を遂げながら、世界の各地に伝播してゆき、それぞれの国

でも使用が検討されているという状態であると考えられる。しかし例え技術は全くそのとおりに移転できたとしてもそこには、固形有機物の性状の違い、慣習としての扱われ方の違い、廃棄物処理に関する制度の違い、関係法令の違い、コストの違い、事業者のマインドの違い等があり、欧州で発展したようには各地において進んでいない。我国にあっては、システムそのものに懐疑的であった10年前に比べ、今は他のシステムの検討と同時にその検討の俎上に乗ることが出来るようになったところで、今後どれだけ実施プラントが建設されることになるのか期待される場所である。

固形有機物のメタン発酵は水分の多い有機物からのエネルギーを取り出す方法としては、自然の力に頼った合理的な手法であることは次章以降でも明らかにするが、微生物分解できない他の廃棄物との混在のなかで、どのように設計できるかが、今後実施プラントの建設が進むか否かを決定してくる。社会システムやコスト、運転体勢のバランスのなかで、この技術を定着させるための補完的な技術も発展して初めて、我国にも固形有機物メタン発酵技術の定着があるものと考えられる。

本章では、固形有機物メタン発酵の経緯と展開について研究し、以下の結論を得た。

- 1) 固形有機物のメタン発酵については、欧州で発達し、それぞれの国でも使用が検討されているという状態である。
- 2) 固形有機物の性状の違い、慣習としての扱われ方の違い、廃棄物処理に関する制度の違い、関係法令の違い、コストの違い、事業者のマインドの違い等があり、欧州で発展したようにはその他の地域において進んではいない。我国にあっては検討の俎上に乗ることが出来るようになったところで、今後期待される場所である。
- 3) 固形有機物メタン発酵は合理的な手法であるが、微生物分解できない他の廃棄物との混在のなかで、どのように設計できるかが今後を決定してくる。この技術を定着させるための補完的な技術の発展も必要である。

## 第 2 章 参考文献

- 1) 中條都一郎：自動車燃料として汚泥瓦斯利用設備と其の操作実績に就いて、水道協会雑誌, pp. 15-24 (1943)
- 2) 本多淳裕ほか：「廃棄物のメタン発酵－理論と実用化技術」株式会社サイエンティスト社, pp. 12-13 (1980)
- 3) 前述 2) p. 138
- 4) Lac De Baere : Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?, Anaerobic Digestion of Solid Waste 2005 Conference Proceedings, pp. 72-73 (2005)
- 5) Danish Energy Agency : Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants, pp. 5-7 (1995)
- 6) IEA Bioenergy Agreement Task11 : Biogas from Municipal Solid Waste - Overview of Systems and Markets for Anaerobic Digestion of MSW, p. 6 (1994)
- 7) 前述 6) p. 10
- 8) Heinz Schulz and Barbara Eder、浮田良則監訳：バイオガス実用技術、オーム, p. 2 (2002)
- 9) 前述 8) p. 3
- 10) 前述 8) p. 4
- 11) 前述 8) p. 7
- 12) 前述 8) p. 9
- 13) 前述 8) p. 11
- 14) 益田光信：バイオガスプラントの経済性、日本有機資源協会平成 15 年度海外視察団エントゾルガ国際見本市と欧州バイオガスプラント視察報告書、pp. 37-38 (2004)
- 15) 岩井重久、申丘澈、名取真：「下・廃水汚泥の処理」株式会社コロナ社, p. 76 (1968)
- 16) 前述 15) p. 77
- 17) 前述 15) p. 82
- 18) 前述 15) p. 83
- 19) 中條都一郎：自動車燃料として汚泥瓦斯利用計画に就いて、水道協会雑誌, p. 63 (1942)
- 20) 前述 15) p. 87
- 21) 前述 15) p. 97
- 22) 前述 15) p. 158
- 23) 益田光信：追加視察、日本有機資源協会平成 15 年度海外視察団エントゾル

- ガ国際見本市と欧州バイオガスプラント視察報告書、p.56(2004)
- 24) 中村正子：デンマークの環境共生型エネルギーシステムに学ぶ  
<http://homepage3.nifty.com/n-masako/frs/den0002.htm>
- 25) 前述 5) p.11
- 26) 前述 5) p.18
- 27) 前述 5) p.22
- 28) 前述 23) pp.67-73
- 29) 前述 23) pp.102-105
- 30) ラインハルトヘニング：再生可能エネルギー ホームページ  
<http://www.bagani.de/re/index.html>
- 31) 益田光信：JOHANNESBURG バイオガスプラント PETRUSHEIM バイオガスプラント、日本有機資源協会平成 15 年度海外視察団エントゾルガ国際見本市と欧州バイオガスプラント視察報告書、p.30(2004)
- 32) Anaerobic digestion of municipal wastes at the city of Kaiserslautern,  
[http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/anaerobic\\_digestion\\_biogas/07bm\\_073\\_93.pdf](http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/bioenergy/anaerobic_digestion_biogas/07bm_073_93.pdf)
- 33) Luc De Baere : Development of anaerobic Digestion Technologies in Europe : Applications to Different Types of waste, Jornadas Internacionales sobre El Aprovechamiento Integral de la Materia Organica, p.3 (1998)
- 33) Luc De Baere : Development of anaerobic Digestion Technologies in Europe : Applications to Different Types of waste, Jornadas Internacionales sobre El Aprovechamiento Integral de la Materia Organica, p.3 (1998)
- 34) VALORGA INTERNATIONAL ホームページ  
<http://anaerobicsystems.com/engelski.htm>
- 35) RIS International Ltd: Feasibility of Generating Power through AD of Garden Refuse from the Sacramento Area, p.4-26
- 36) KOMPOGAS ホームページ  
<http://www.kompogas.ch/en/Downloads/downloads.html>
- 37) 前述 35) p.4-2
- 38) 前述 23) p.65
- 39) 前述 23) pp.62-64
- 40) 環境省：汚泥再生処理センター構想 (1997)

[http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun\\_k.php3?kid=209&serial=10506](http://www.env.go.jp/policy/hakusyo/honbun_k.php3?kid=209&serial=10506)

41) 環境省 日本の廃棄物処理 平成 18 年版 (2008) p 6

[http://www.env.go.jp/recycle/waste\\_tech/ippan/h18/data/disposal2.doc](http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h18/data/disposal2.doc)

42) 国土交通省：バイオソリッド利活用基本計画 (2002)

<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/biosolid/030829.html>

43) 国土交通省 下水汚泥のエネルギー利用について (2006)

[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf\\_ecofuel/02/mat01\\_5.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf_ecofuel/02/mat01_5.pdf)

44) 独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマスエネルギー導入ガイドブック (第 2 版), pp.193-199 (2005)

45) 前述 44) pp.132-139

### 第3章 固形有機物の微生物学的処理法の比較と考察

#### 3.1 はじめに

固形有機物の微生物学的処理法としては、好気性発酵のコンポスト化と嫌気性で行うメタン発酵およびそのコンポスト化がある。どちらも「発酵」と呼ばれる操作で、固形有機物を有用物に変える或いは処理するものである。ここではその両者の手法の違い或いは同一性について検討を行い、嫌気性メタン発酵システムのどのような点に優位性があり、どのような点に問題があるのかを明らかにしたい。

固形有機物の微生物学的処理法としては、従来コンポスト化が一般的であった。コンポスト化では、好気性条件下での菌の存在により、固形有機物中のデンプン質のような易分解性部分から分解が始まり、菌体の増殖があり、温度が上がり、水分の蒸発が起こる。有機物部分は最終的には二酸化炭素と水に分解され、残った栄養塩類が新しい有機物の生育に役立つ。この方法は人手による混合だけでも起こるため分かり易く、生ごみ等を微生物で処理するというときは先ず最初に考えられる一般的な手法である。コンポスト化が完全にできれば、固形有機物はそれ以上微生物分解しなくなり臭気が減って取扱いし易くなり、保存も利くようになり、ひいては製品として流通にも耐えるようになる。

これに対しメタン発酵では、固形有機物を嫌気性条件下で任意の一定温度に保つことで、その嫌気分解を起こさせてメタンと二酸化炭素に分解し、これをエネルギーとして利用する。またその発酵残渣は、コンポスト化されたと同じように、それ以上激しい微生物分解はしなくなるので臭気の発生はなくなり、好気性下で熟成させることでコンポストや液肥として利用できるものになる。エネルギー製造装置であるため、施設としてはコンポスト装置よりも複雑で高価になりがちであるが、エネルギー収入はどこでもほぼ一定の価値で売ることができるし、自らの運営費削減に役立つ。食の消費場所と生産場所とが大きく乖離している現在、コンポストでの循環が困難な場所も多く、メタン発酵も考慮されるようになってきた。

固形有機物の一般的な処理方法では、我国の収集体制、処理体制から、その大半は焼却することになっている。欧州では分別収集において、固形有機物はバイオウエイストとして収集され、それはコンポスト化やメタン発酵に持ち込まれることが多く、微生物学的な処理は一般的である。また欧州では未だ埋め立てによる処理も多い。しかし埋め立てについては近年、埋立地での嫌気性分解に伴うメタン放出が地球温暖化を促進させるとして、EU指令でそのままの埋め立ては禁止の方向にある。そこでは埋め立ての前に焼却することが基本としているが、微生物学的分解されたものの埋め立ても認められている。

我国においても従来の焼却一辺倒の廃棄物処理行政は見直しを迫られており、バイオマスー固形有機物ーの処理に微生物学的処理を行うことについて、さまざまな検討が行なわれるようになってきており、ここではその中の一つの議論である、メタン発酵とコンポスト化の違いについて総合的に検討する。両者におけるシステムの違いと特徴、同じ固形有機物原料についてメタン発酵と好気コンポスト化を行うときの分解特性の違いを実験的に検討するとともに、直接コンポスト化した場合のコンポストとメタン発酵残渣コンポストについても実験的に比較検討する。このことにより、この二つの手法に必要な適用条件が明らかになり、より合理的なシステム構築が可能となる。

### 3.2 システムの比較

#### 3.2.1 概要

ここでは、メタン発酵システムとコンポスト化システムについてその違いを検討してみる。それぞれのシステムは歴史的に育った経緯が異なり、同じ考え方に立っていないので比較が困難な点が多い。しかし、それ故にこそ、そのシステムの目指す目的と、それに必要なシステム構成を確認しておくことが、全体を比較する場合重要な要件となる。

比較であるため同じ原料をメタン発酵システムとコンポスト化システムで処理する場合をここでは考える。しかし原料がどのようなものを想定するかで、どちらの方式が合理的かは異なる場合もある。例えば牛糞が原料であったとすれば、既に体内で消化しているため、メタン発酵ではエネルギーの取り出し量が少なくメリットは小さいが、コンポスト化の場合は発酵日数も減らせるし、原料を破砕することも、特別の脱臭することもなく、粒径のそろった粕殻を副資材に用いれば、均質な製品が問題なく得られる。

ここではより廃棄物に近い固形有機物残渣を想定する。ごみとして排出される食品残渣や紙ごみはリサイクルのシステムからも外れ、最後に焼却埋立てされる直前のものである。この利用と再資源化は廃棄物処理に関する地球温暖化防止に大きく貢献する。このような原料はその構成が千差万別で破砕、異物除去、脱臭などの施設が必要となる。メタン発酵システムでもコンポスト化システムシステムにおいても万全の体制をとった設備が求められ、システムのあり方について多くの要求が住民から寄せられることとなる。

メタン発酵システムについても、コンポスト化システムシステムについても、様々な方法があるが、今後の議論の理解のため、それぞれの例を図 3-1<sup>1)</sup>、図 3-2<sup>2)</sup> に示す。必ずしも以後の議論対象全てをこの二つのシステムが含有しているというわけではないが、いずれも数 10 t /日の処理量施設の典型である。





### 3.2.2 原料受入れ施設

プロセスが要求する原料供給速度と、発生源からの収集速度のギャップを埋めて、一定量の原料を発酵装置へ送り込むための貯留施設がメタン発酵システムでもコンポスト化システムでも必要である。例を図 3-3<sup>3)</sup> および図 3-4<sup>4)</sup> に示す。

貯留必要容量は収集方法と処理方法のギャップで決まる。発酵槽への供給は微生物の餌を与えているために原則 24 時間 365 日の供給が必要な一方、原料収集は土日が休みであるとするなら、最低その 2 日分に当日分を加えた 3 日分程度の容量は必要となる。更に、その原料品質が日によって変わるなら、その均質化混合のための容量も必要になる。原料を発酵槽へ送る前に、後述の破碎や異物除去の設備があるときは、そこにも貯留施設は必要になるが、それぞれの容量は施設の運転時間で異なる。破碎や異物除去を日勤の運転員が行うものとし、設備規模も昼間だけでこなせる大きい規模とするなら、前貯留容量は小さくてもよいが、24 時間運転で、発酵槽と連動させることも、夜間運転人員が確保できるなら可能となる。

原料が生ごみのような固形有機物の場合、3～6 日貯留では腐敗と悪臭ガスの発生は避けられない。原料の混合と搬出の役割を兼ねたクレーンを備えた貯槽と、原料搬入車両全てを覆い負圧状態が維持された密閉空間が必要である（図 3-3 参照）。原料が毎日同じなので混合が必要ない比較的小規模の装置にあっては、原料切出し用スクリューコンベヤなどを付属させた 3 日分の密閉貯留槽とし、これに原料受入れのときだけに開閉操作する扉蓋を付け、臭気対策としては開閉時のみ吸引負圧を維持し常時は発生ガスだけ対処する（図 3-4 参照）。

いずれの方法も臭気飛散防止のため吸引した空気は悪臭処理装置で処理するのが原則である。

悪臭処理装置はその規制値により方法が変わってくるが、24 時間 365 日運転が必要となるため、ランニングコストが最も大きな問題となる。活性炭や薬品を使うものは特に注意が必要となる。

これらの原料受入れのための設備は、システムがメタン発酵でもコンポスト化であっても同じ考え方となるはずであるが、コンポスト化では原料を単に平床堆積させておくなど簡易な場合が多い。施設が小規模で、原料が牛糞や単一の食品残渣などの場合で臭気対策を考えないときのプラントである。本来は発酵槽への原料供給も、コンポスト化とメタン発酵では同じようなタイミングとなるので、必要容量も同じである。脱臭施設の規模は、この原料用だけでなく、発酵本体からの臭気もある。コンポスト化ではその量が大きいいため、脱臭施設は大きなものとなるのが一般的である。

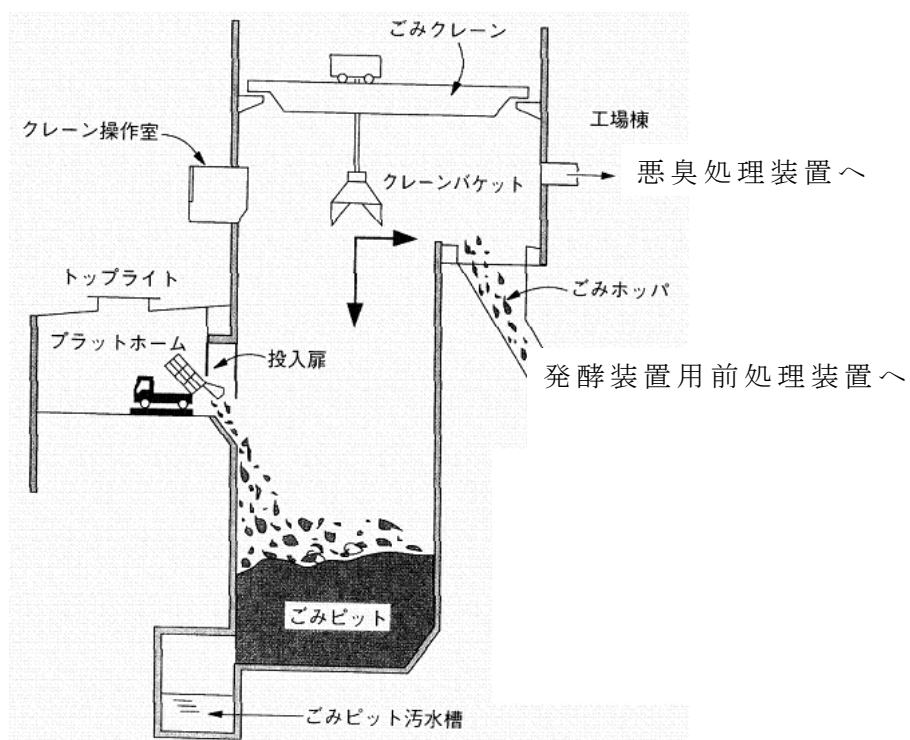


図 3-3 固形有機物処理での原料受入れ施設例 1<sup>3)</sup>

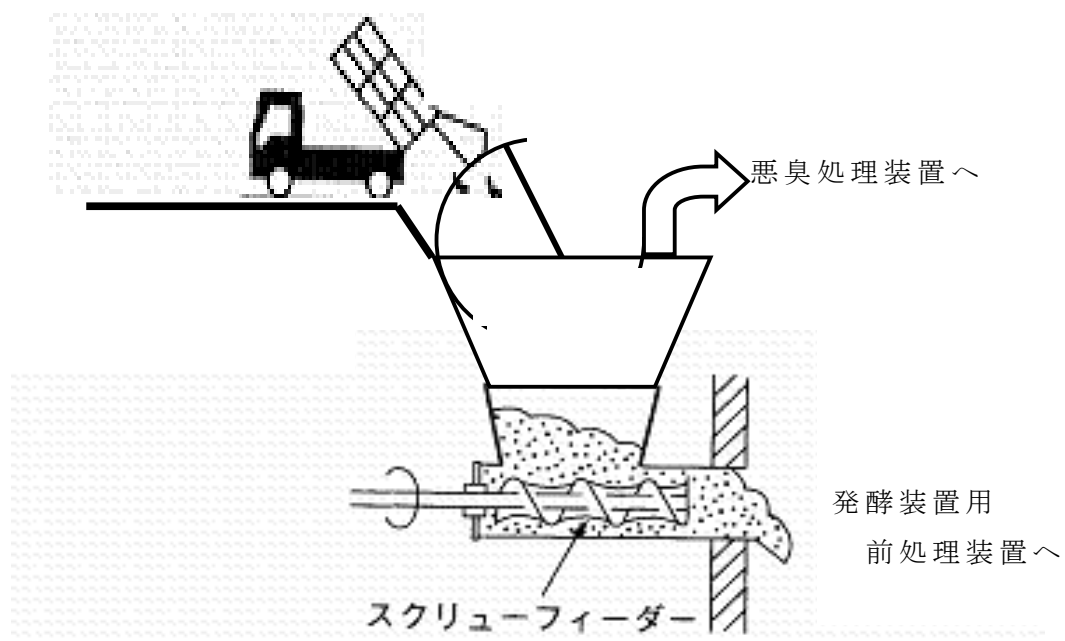


図 3-4 固形有機物処理での原料受入れ施設例 2<sup>4)</sup>

### 3.2.3 原料破碎施設

原料の大きさや形状は様々なものが持ち込まれ一定しない。これを取扱いの面と反応性の両面から、ある一定サイズまでに破碎することが必要となる。廃棄物がバイオマス原料となる重要なプロセスで、後続の設備のあり方と大きく関係する。

原料取扱いの面だけでも、設備条件として、サイズに見合う輸送路と輸送装置、発酵槽内部の攪拌翼や開口部の大きさなどを先ず考慮する必要がある。例えば、スラリー状まで破碎するならスラリーポンプで移送できる。3cm 前後に破碎するならピストンポンプやスクリーコンベヤで移送する。10cm を越えるようなものにしか破碎しないのならフライト式やベルト式のコンベヤで移送することになる。

メタン発酵装置において、スラリー状まで破碎した場合ならば水処理用メタン発酵槽のようなプロペラ攪拌となるが、数 cm の大きさを想定する発酵槽なら、パドル式の攪拌となる。コンポスト化では通常スラリー状までの破碎は行わず、数 cm 程度の大きさまでの破碎となる。従って攪拌もパドル状が多い。スラリーまですると酸素の供給分散が困難となる。

スラリー状になるまで破碎するなら発酵槽や搬送設備は簡便なもので構わないという長所もあるが、小さく破碎するにはそれだけエネルギーを必要とする。破碎物を立方体として考えると、一辺の大きさの比に反比例して必要破碎エネルギーが増加する。30 t / d 程度のプラントで 3cm 前後までの破碎をする場合は、原料 t あたり 10kWh 程度を消費する。これを 1mm 程度のスラリーに近い破碎物とするならば、サイズで 1/30、エネルギーで 30 倍必要となり、原料 t あたり 300kWh 程度を消費することになり、固形有機物メタン発酵の施設で発電できる電力全体と同じ程度になってしまう。

原料の破碎程度を決める要素の一つは、破碎を進めることで発酵槽での反応速度を高めることができる。表面積が大きい分反応も起こり易い。しかし、これで設備を小さくすることが出来ても、発生するエネルギー量の変化は少ないため、破碎エネルギー代償が見合っているか検討が必要である。物理的にエネルギーを投入して反応を進めるのに比べ、微生物の力が及ぶならそれを利用するほうが少ないエネルギーで成果を上げられるのが一般的である。機械的破碎に頼るよりも、有機物の水への溶解と微生物の活動により、必要な大きさまで碎かれてくるのを待つほうが使用エネルギーは少なく済むのが一般的である。

KOMPOGAS 式メタン発酵では、3cm 程度の破碎で発酵槽に投入するが、出てくる残渣はその破碎サイズでの繊維状のものやプラスチックや異物で、分解可能な有機物がそのまま残って出てくることはないのもので、これ以上の破碎は必要な

い。55℃の温度でメタン発酵を 20～30 日間受ければ、大概の分解可能な有機物は分解されて繊維状のものだけが残ることになる。

コンポスト化でも 3cm 程度の破碎で発酵槽に送るのが一般的である。出てくるコンポスト製品は繊維の多い顆粒状となる場合が多い。これは腐敗性有機物はかなりの部分が熱を発生させて気化するものの、残りの部分はフミン質化してコンポスト製品となるためである。

メタン発酵では湿式でも乾式でも発酵槽内では、原料と菌は水のある状態で接しており、表面から菌が原料を分解してゆく。原料はスラリー状であるため空気を遮断するだけで嫌気状態は維持できるし、熱交換機と保温で全体を 35℃や 55℃前後に維持できるので、加水分解、酸発酵、メタン発酵という微生物活動は発酵槽内全体、原料の表面全体で進行してゆく。

しかしコンポスト化では酸素の供給がないと微生物の発熱分解はおきない。コンポスト化で原料表面に十分な空気供給が行えるか否かは、原料の水分と破碎の程度と攪拌が関係する。最も大きな問題は菌の存在には水分が必要だが、空気の供給には水分は邪魔であるという矛盾をどう解決するかにある。原料が数 cm 以下に破碎されて完全に乾燥していれば、攪拌で空気供給は簡単になるが、菌は少なく、発酵は進まない。逆に水分が多いと、菌の繁殖には適するが、空気の供給が困難になる。空気の行かないところは直ぐに嫌気腐敗を起こし始める。このため結局、水分の多いときは、おが粉や粕を混ぜて、全体の水分率を減らすとともに、これが空気通路のための‘structure’（水分調整材、副資材）となり、原料の各部に空気を供給することを可能とし、コンポスト化が進むことになる。水分の少ないときは、スプレーで水分を適正に与えてコントロールすることが必要になるが、空気の通り道を確保しながら、一方では万遍なく水分を供給することは至難の業である。一般的には腐敗性有機物原料は水分が過剰の場合が多く、粕などの‘structure’となる副資材を使用してコンポスト化が行なわれる。

腐敗性有機物の酸素との反応は早いため、堆積するところは直ぐに酸素欠乏の状態となる。水分で覆われた有機物の固まりにあっては、微生物により表面の有機物が酸素と反応し発熱して水分を蒸発させて、始めて酸素は更なる内部へと侵入し次の反応に寄与できる。そして最深部に到達してコンポスト化は完了する。この手順は破碎された材料の固まりにあっては、或いは破碎された材料の個々においても、同じ過程を踏まざるを得ない。従ってコンポスト化では、表面はコンポスト化されたように見えても、内部が未だ酸化反応できておらず嫌気腐敗している場合が多く、それは臭気発生となって現れる。

嫌気発酵にあってはその矛盾が無く、全てが始めから最後まで嫌気状態で、

従ってどこからでも微生物反応が起こる。更に原料は発酵槽内で高温の液中に没し攪拌を受けるため、微生物との接触はどこでも活発におこり、それは原料の崩壊も引き起こすため、前処理で行う発酵のための破碎は精緻でなくてよい。

#### 3.2.4 異物除去施設

異物除去は破碎と前後して行なわれるのが一般的である。完全な分別体制のできた地域から排出される生ごみなら、異物除去は不要となる。しかし、現実には何らかの異物除去が必要となるわけで、その内容は地域や収集先で異なるところとなる。

異物除去は、後続処理プロセスでのトラブル回避のためと残渣をコンポスト化する場合の製品中への異物混入を排除するために行われる。

後続装置での故障回避のための前処理での異物除去は、後続装置の性質により大きく異なる。ある程度の異物混入も認められる装置なら大雑把な除去でよいし、異物混入は認められない発酵槽なら精緻な除去を行わねばならない。異物除去対象は、微生物分解しないプラスチックや金属、小石などとなる。

メタン発酵の場合、プラスチック類は破碎されていても、スカム形成の要因となる。スカム生成はメタン発酵につきまとう最大の問題である。液中からバイオガスが発生してくるとき、比重の軽い異物に付着するためこれを浮上させる。形成されたスカム層は成長し固化するため粉碎が必要となる。金属や小石は沈殿して発酵槽から排除されにくくなる。これも大量に沈殿物が堆積してしまわないうちに排除する必要がある。発酵槽での対応が如何なるものかにより、前で異物除去をどこまで精緻にやるのかが決まる。

コンポスト化の場合はパドルで攪拌するのに支障がなければよいわけで、装置としての許容性は高い。実際異物でトラブルが生じて、その箇所へ行く事が出来て対処できることも強みである。メタン発酵では密閉タンクで酸素のない場所であるため、人がそのトラブルの箇所へ行くのは並大抵ではない。

コンポスト製品からの異物除去は、原則完全除去が日本の場合必要である。異物の混入はコンポストの使用側農業者にとっても、製品作物にとっても望ましくない。プラスチックやガラス片、陶磁器片、金属片などがその対象となる。

異物除去の方法はその性質の差を利用して、対象物から離す。トロンメルや振動などを利用した大きさでの分離、風力機械による比重差での分離、磁選機による金属分離などを組み合わせて使用することになる。

しかし前処理で分離する場合、原料の水分が多いと分離は困難になる。分離された異物への有機物付着量も増え、発酵槽へ投入される有機物が減り、肝心のエネルギー原料も減らしてしまう。また原料の付着した異物は腐敗が激しく

臭気発生量も多いため取扱いが困難になる。このようなことから、前処理での分離は必要最小限とすべきである。このため発酵槽の構造がどの程度の異物混入を許すかは重要である。

コンポスト化が終了した製品について、仕上げ段階で異物除去を行うなら、原料は乾燥していて臭気も少なく、分離がしやすい。また分離結果も判定しやすい。製品としての販路が不特定多数の場合は、徹底した異物除去が必要になる。特定の契約顧客のみの場合は、価格とのバランスの中で、ある程度異物除去された製品、徹底的に異物除去された製品など様々な形が可能であるし、事故も発生しにくい。

### 3.2.5 発酵槽

発酵槽は菌体の繁殖条件（嫌気好気、温度など）のもとで原料有機物と菌体の接触を図り、含有有機物を分解する装置である。嫌気性メタン発酵の発酵槽は完全密閉で水分が多い基質を攪拌する装置と、発生するガスの対応や温度を維持するための加温・保温装置がつく。好気性コンポストの発酵槽では開放の場合もあるが、建屋等で囲い臭気を集める場合が多い。空気供給装置がつき、自然発熱、乾燥するため、攪拌装置もそれに適した形となる。これらの特徴を比較すると次の表 3-1 のように表わすことができる。

表 3-1 発酵槽におけるメタン発酵とコンポスト化の比較

|         | メタン発酵・コンポスト化                                      | 直接コンポスト化  |
|---------|---|---|
| 空気条件    | 嫌気<br>発酵槽；密閉型                                     | 好気<br>発酵槽；開放型<br>空気供給装置（ブロワ、散気装置など）<br>水分を 70%程度にするための副資材添加 |
| 温度      | 36℃近辺または 55℃近辺<br>原料加温装置（ボイラ、熱交換器など）<br>発酵槽には保温施工 | 常温～80℃程度<br>微生物発酵による温度上昇が自然に起こる。殺菌の意味からも 65℃以上を通過させたい。      |
| 発酵槽の大きさ | 分解物濃度 15%なら<br>20～30 日                            | 分解物濃度 15%なら<br>20～30 日                                      |

|                        |   |  |
|------------------------|---|--|
| 菌体との混合                 | <b>攪拌装置</b><br>密閉槽であるためモーターは外となり、シールが必要。スラリーの低速攪拌：2～5kWh / t 程度             | <b>攪拌装置</b><br>開放槽で半乾燥状態の牛糞などのパドル等での攪拌となる。20～40 kWh/t 程度必要。                          |
| 原料の送り                  | スラリー状態であるため原料の添加で押し出される   | 攪拌のときに基質を送り出す動作を入れる  |
| 臭気                     | <b>生成ガス：バイオガス</b><br>硫化水素などの臭気成分を含む。バイオガス利用装置で必要な場合前処理。                     | <b>生成ガス：二酸化炭素ほか有機性ガス</b><br>二酸化炭素以外にアルコールやエステル等の有機性ガスが発生する。<br>飛散防止と集めたガスの臭気分解装置が必要。 |
| 水分分離・調整                | <b>脱水機による分離</b><br>固形物が残る場合、2 段で行う。1 段目はスクリーンによる固形物除去、2 段目は比重分離でより細かいものを分離。 | <b>発酵熱による自然乾燥</b><br>原料段階で、発酵槽を通過したとき、通気性の良いコンポストができるよう、副資材等で調節。<br>コンポスト化の後では行わない。  |
| コンポスト<br>後発酵<br>(熟成発酵) | <b>堆積と切り返し</b><br>既に酸素と反応する炭化水素は少ない。<br>アンモニア態窒素などの酸化（硝酸態化）などが進行する。         | <b>堆積と切り返し</b><br>同左   |

### 3.2.6 付属施設

メタン発酵施設では上述の施設のほかに、バイオガス利用施設と分離液の利用または処理施設を設置する場合が多い。コンポスト化施設では原料貯留前処理から排出される汚水の処理が問題となる。メタン発酵においても発生するが汚水はそのまま発酵槽に原料として投入できるので問題ない。

メタン発酵におけるバイオガス利用施設は施設の目的や発生ガス量によって異なる。発酵槽の加温のための熱源としてバイオガスを利用することが多くの



施設で行なわれている。下水汚泥処理やビール廃水処理のメタン発酵でもバイオガスボイラは設置され、購入エネルギーの削減が計られる。しかしこのような有機物濃度の低い場合、発生ガス量も少なく、発酵槽加温に利用するとバイオガスが残らない場合があり、その場合発電はされていない。原料有機物濃度が高く、発酵槽加温にバイオガスを利用しても余るという場合、発電機が設置される。発電施設にはそれなりのイニシャル、ランニングのコストがかかるので、それを賄っていけるためには、50～100 kW 程度以上の大きさが必要であろう。しかしながら、近年は、小型発電機でも発電排熱ボイラを有し発酵槽加温に用いることが可能であることから、そのような施設も建設されている。

分離液の利用または処理施設の必要性や形態は、地域によって異なる。分離液には有機物や栄養塩類が豊富であるため、有機物の酸素要求量を減らせば液体肥料として利用できる。欧州では多くのメタン発酵施設が稼働しているが、そのほとんどは分離液を液肥として利用している。利用しても過剰窒素投入にならないよう管理された施肥が行なわれている。

日本においては、液肥は一般的でない。現在液肥について一部稲作への施肥としての研究がはじまっているが、耕種農家にとっては農地を固めてしまう、或いは特殊な畝を作成しなければならない、施肥のマニュアルがないなど、その使用は一般的でない。このため公共用水域への放流が必要となる場合があり、そのときはこれを水処理しなければならない。水処理をする場合、液肥としての意味のあった窒素含有量は除去すべき負荷に転じ、液肥としては問題とならない、COD、色度といったものが、除去しにくい物質として立ち現れてくる。メタン発酵により得られるバイオガスやコンポストも、水処理施設の経済的負担、エネルギー的負担が相対的に高すぎる場合は計画全体も頓挫しかねない場合もあり、注意が必要である。コンポスト化施設の場合も、原料から出る汚水の処理が問題となる場合も多い。この汚水は原料と性状が同じで、腐敗し易く悪臭を発する。発酵槽で散布する場合もあるが、汚水の出る原料の場合、それを蒸発させられるだけの発熱量が得られない場合も多く、注意が必要である。

脱臭施設は表 3-1 にも記載しているが、メタン発酵の場合とコンポスト化の場合とでは、その発生源、量が大きく異なる。メタン発酵の場合の臭気発生源は原料前処理過程のものがほとんどであり、発酵過程で発生する臭気成分はバイオガスに含まれているため、熱利用の際、熱分解される。しかしコンポスト化の場合、原料前処理過程で発生する臭気はメタン発酵と同じであるが、更に発酵過程で発生する臭気がある。有機物の微生物分解がプラントの目的であるが、そこには必然的に臭気の発生が伴う。コンポスト化の主要な課題は、原料有機物の分解、その熱量発生に伴う水分蒸発排除によるコンポスト製造、及び

そのとき発生する臭気処理と言っても過言でない。

### 3.2.7 まとめ

メタン発酵施設とコンポスト化施設は、そのいずれも微生物による有機物の再利用であるがゆえに、プラントシステムとしても多くの点で共通している。

原料の受入れ貯留、破碎、異物除去といった部分は、メタン発酵もコンポスト化も同じ原料なら同じような工程が必要になる。更に発酵槽そのものも、滞留時間からいっても、内部装置からいっても必要なものは大差ない。微生物の活動の結果生じるガスについても、メタン発酵ではエネルギー利用できるため、その過程で臭気処理できるが、コンポスト化では処理施設が必要になり、そのイニシャル、ランニングコストが負担となる。メタン発酵のエネルギー利用施設は、そこで得られるメリットとのバランスで施設は設置されるため、コスト負担と考えなくてよい。ガス発生量が大きいときは大きなメリットを生める。しかしメタン発酵では消化液の脱水濾液が問題となる。液肥としての利用がなければ、処理施設が必要でそのためのイニシャル、ランニングコストが問題となる。コンポスト化の場合も原料によっては污水处理が必要とな。

このように、どちらの手法もその条件によっては負担のかかる施設を設置せねばならなくなり、これを如何に乗り越えるかが、その事業の成功の鍵をにぎることになる。これらの負担を、コンポスト化であればコンポストの販売、メタン発酵であればエネルギーの販売やコンポストの販売のメリットで、これを凌駕できれば、自立した施設として存在することができるようになる。

## 3.3 微生物反応の比較

### 3.3.1 概要

メタン発酵・コンポスト化と直接コンポスト化を2種類の実験から比較検討してみる。それぞれ同じ原料について実験を行って比較する。

実験1は微生物反応による有機物分解を主にみる。原料は生ごみを主体とし、これに籾殻と紙ごみを加えたものを使用する。籾殻も紙ごみもコンポスト化における空気流通のための「ストラクチャー」となるし、メタン発酵ではアンモニア濃度低下にも役立つ。

実験2ではコンポスト製品まで作成して、その効果を比較検討する。原料は生ごみとし、コンポスト化に必要な「ストラクチャー」としては軽石を使用して、生ごみ以外の影響を排除したところでコンポストを作成し検討する。

いずれの手法でも微生物により分解し易い部分、デンプンや糖、たんぱく質や脂質が分解してガス化する一方、最後に微生物が分解しにくい物質、リグニ

ン、セルロースなどが残り、これが熟成発酵コンポストの原料となる。熟成発酵ではアンモニア態窒素の硝酸化などが進み、コンポストとして完成する。

これらの一般的な内容はおよそ理解されているものの、対照とする原料が異なっていて比較されることが多いため、議論とならないことが多い。ここでは同じ原料を用意して、それぞれの微生物処理を行って、内容を比較することで、違いを明確にしたい。

### 3.3.2 微生物反応の違い

メタン発酵そのものの分解経路は従来ほぼ明らかにされてきている。分解できる固形有機物の成分は炭水化物、たんぱく質、脂質で表されるが、それらがメタン発酵する場合、成分により分解経路や分解時間は異なるものの、最終生成物はメタンと二酸化炭素となる。基本的な分解経路は、①固形有機物の酵素による加水分解、②加水分解生成物の酸発酵、および③酸発酵生成物のメタン発酵と表現できて、①と②は酸生成菌、③はメタン生成菌により進行する分解過程である。この過程についての記述は多いが、一例を図 3-5<sup>5)</sup> に示す。

実際の有機物には水分が多く含まれ、残りの固形分の部分にメタン発酵する有機物とメタン発酵できない有機物、及び栄養塩類が含まれており、それらの比率は有機物によって異なるため、分解率は一律でない。

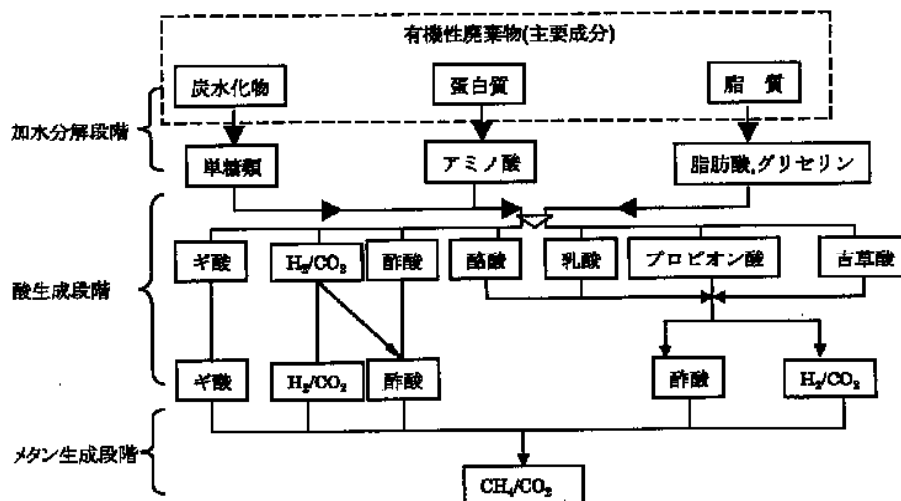


図 3-5 メタン発酵による有機性廃棄物の分解過程<sup>5)</sup>

一方、コンポスト化における各有機物の分解の過程は、明らかにされていない。メタン発酵では絶対嫌気の雰囲気中で、固形有機物といっても高濃度液体のなかで起こる微生物反応であるため、同じ原料なら再現性のある分解過程が得

られる。コンポスト化の場合、粉碎された有機物の間を空気が通り抜けることが期待されるが、均質ではないため嫌気の部分も多い。

活性汚泥の曝気槽においても、1%の分解有機物濃度を越すような場合の好気反応においては、液状での反応であるため、一定の酸素吸収効率での反応が計算でき、一定の D0 の維持が行なわれるなら、再現性のある分解が得られる。この場合でも、曝気の量、分散方式には細心の注意を払ってそれが可能となるわけで、一瞬の空気遮断も D0 の降下をもたらす。

コンポスト化の有機物濃度はその何倍もある有機物濃度であるにもかかわらず、空気の配分は曝気槽に較べれば完全ではないし、その供給量も少ない。更には、空気との反応はその一つの粒子においても、その表面のみが酸素との反応の機会があるだけで、内部では嫌気反応が進むと考えられる。従って、コンポスト化においても、先ずは通性嫌気性菌による固形有機物の加水分解が主体の反応がすすみ、固形有機物の崩壊が進む。次に、有機酸は酸化反応で二酸化炭素と水に分解する部分と、不完全酸化でケトン化する部分、あるいは嫌気反応でアルコールに分解する部分などに進む。また有機酸とそのアルコールとの反応によるエステルなども発生すると考えられる。この結果、発生するガスは表 3-2<sup>6)</sup> に示されるように、アルコール、ケトン、アンモニアなどがコンポスト化で大量に発生するガスとして観測される。アンモニアも蛋白質の嫌気分解で発生する。

表 3-2 コンポスト化及びメタン発酵後の熟成発酵で発生するガス成分<sup>6)</sup>

Table 2: Emissions of volatile organic compounds during aerobic composting and during maturation after anaerobic digestion.  
expressed as grams per ton of biowaste

| Compounds                        | aerobic | maturation after anaerobic | ratio aerobic/anaerobic |
|----------------------------------|---------|----------------------------|-------------------------|
| Alcohols                         | 283.6   | 0.033                      | 8593.9                  |
| Ketones                          | 150.4   | 0.466                      | 322.7                   |
| Terpenes                         | 82.4    | 2.2                        | 37.5                    |
| Esters                           | 52.7    | 0.003                      | 17566.7                 |
| Organic Sulphides                | 9.3     | 0.202                      | 46.0                    |
| Aldehydes                        | 7.5     | 0.086                      | 87.2                    |
| Ethers                           | 2.6     | 0.027                      | 96.3                    |
| Total Volatile Organic Compounds | 588.5   | 3.017                      | 195.1                   |
| NH <sub>3</sub>                  | 158.9   | 97.6                       | 1.6                     |
| Total                            | 747.4   | 100.617                    | 7.4                     |

### 3.3.3 微生物分解反応実験（実験1）

コンポスト化とメタン発酵の有機物分解の違いを、実験的に確かめるために共通の原料を用いて、それぞれの反応を行った。

コンポスト化は原料性状の変化を取るべく回分実験とし、メタン発酵では高温メタン発酵連続実験として、その分解の違いを見た。

#### 1) 原料

原料の基本は生ごみとし、これにそれぞれの微生物反応しやすくするため、籾殻と紙ごみ（新聞紙）を混合した。籾殻はどちらの微生物反応にもほとんど寄与しないと考えられるが、コンポスト化ではよく利用される空気分散のための水分調整材である。籾殻はメタン発酵ではガス発生に寄与しないし、スカム形成に関係しそうであるため敬遠される。紙ごみはコンポスト化では分解せず、更に田畑に残ることが製品のイメージを損ねることもあり敬遠される。メタン発酵では紙ごみは窒素分の少ないガス化有機原料として最近受入れられるようになってきた。

種汚泥としては、コンポスト化では下水汚泥を用い、メタン発酵では同種の運転中のメタン発酵装置からの発酵汚泥を用いた。

以下に各原料の調整を示す。

表 3-3 コンポスト化実験の原料

| 原料        | 生ごみ | 紙ごみ | 籾殻 | 下水汚泥 | 合計  |
|-----------|-----|-----|----|------|-----|
| 混合比率(湿重量) | 100 | 10  | 8  | 4    | 122 |

表 3-4 メタン発酵実験の原料

| 原料        | 生ごみ | 紙ごみ | 籾殻 | 発酵汚泥 | 合計  |
|-----------|-----|-----|----|------|-----|
| 混合比率(湿重量) | 100 | 10  | 8  | 24   | 142 |

ここで使用した生ごみは表 3-5 の組成によるものを、図 3-6 により調合したもので、これを上述の比率にて混合して使用している。この組成は我国の生ごみ組成分析結果<sup>7)</sup>を基にしている。

尚、メタン発酵装置への原料注入は注射器で投入するため、これを水で2倍希釈したものを原料として使用した。

表 3-5 人工生ごみの細組成

| 生ごみの組成       |         |              | 文献調査のデータ <sup>7)</sup> |             |
|--------------|---------|--------------|------------------------|-------------|
| 大分類<br>(湿重%) | 組成      | 湿重含有率<br>(%) | 家庭系 (%)                | 事業系 (%)     |
| 野菜類<br>(50)  | キャベツ    | 10           | 平均 51.4<br>(43.5～58.5) | (12.8～59.2) |
|              | ジャガイモ   | 10           |                        |             |
|              | ニンジン    | 10           |                        |             |
|              | 大根      | 10           |                        |             |
|              | 白菜      | 10           |                        |             |
| 果物<br>(20)   | リンゴ     | 2.5          | 平均 22.6<br>(17.4～32.0) | (4.6～30.6)  |
|              | オレンジ(皮) | 7.5          |                        |             |
|              | バナナ(皮)  | 10           |                        |             |
| 残飯類<br>(20)  | ご飯      | 10           | 平均 9.3<br>(2.2～16.4)   | (2.9～28.9)  |
|              | パン      | 2.5          |                        |             |
|              | 麺類      | 7.5          |                        |             |
| 肉類<br>(2.5)  | 挽肉      | 2.5          | 平均 2.8<br>(1.6～4.3)    | (0.0～8.8)   |
| 魚介類<br>(5)   | 魚       | 3.5          | 平均 3.8<br>(.3.2～5.3)   | (0.1～12.0)  |
|              | 骨       | 1.5          |                        |             |
| 卵類<br>(2.5)  | 卵       | 2.5          | 平均 2.5<br>(0.9～4.5)    | (0.2～4.6)   |

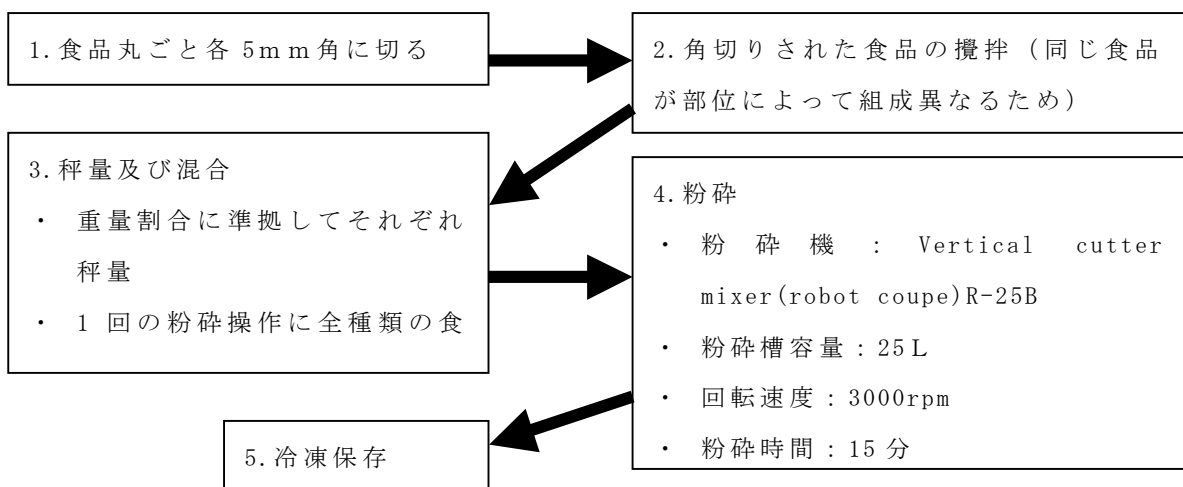


図 3-6 人工生ごみの調整方法

## 2) 実験装置

### 2-1) コンポスト化実験装置と分析

コンポスト化実験装置は約 40 L (320mm φ × 800mm H)、30 kg 程度を充填できる大きさとし、空気供給や攪拌が出来るようにしたものである。攪拌は手で 1 日 1 回行い、供給空気量は 10 L / 分とした。図 3-7 にその概要を示す。

実験は装置内に原料を投入し、空気を供給する。発酵熱による昇温の様子を見るとともに、排出ガスのサンプリング、変化してゆく原料試料のサンプリング、及びそれらの分析を行った。サンプリングにより減少する量については計算で補正をした。分析項目と其の方法を表 3-6 に示す。

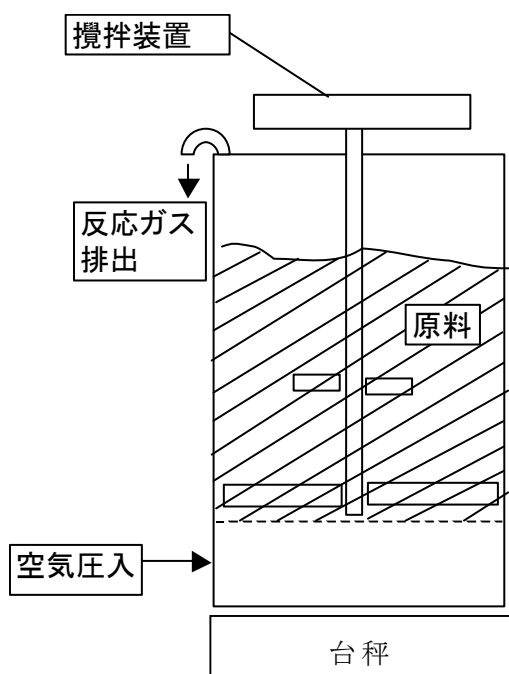


表 3-6 分析項目と其の方法

| 測定項目     | 測定方法                            |
|----------|---------------------------------|
| TS       | 下水試験法 <sup>8)</sup>             |
| VTs      | 下水試験法 <sup>8)</sup>             |
| CODcr    | 携帯用多項目迅速水質分析計、DR/2400<br>(ハック社) |
| 炭水化物     | フェノール-硫酸法                       |
| TC       | CHN コーダー、MT-2 (ヤナコ)             |
| TN       | CHN コーダー、MT-2 (ヤナコ)             |
| アンモニア性窒素 | アンモニア性窒素用自動分析装置<br>(ブランルーベ社)    |
| 二酸化炭素    | ガスクロマトグラフ、GC-14B<br>(島津製作所)     |
| メタン      | ガスクロマトグラフ、GC-14B<br>(島津製作所)     |
| リグニン     | サウスゲート変法 <sup>9)</sup>          |
| セルロース    | サウスゲート変法 <sup>9)</sup>          |

図 3-7 コンポスト化実験装置

### 2-2) メタン発酵実験装置

メタン発酵実験装置は攪拌装置のついた完全混合形の、連続高温メタン発酵装置とした。反応有効容量は 10 L とし、発生するバイオガスはガスバッグで捕集し分析した。また、リアクターは温水保温ジャケット付きで、55℃ に保てる。基質の投入は安定運転時には所要量 (300 g -wet) を 1 日 1 回、注射器で注入した。尚、300 g 中の生ごみ等の量は注射器での投入のため濃度を薄め 150 g としている。原料注入前には同量をサンプリングし、その性状を分析した。

実験装置の概要を図 3-8 に示す。

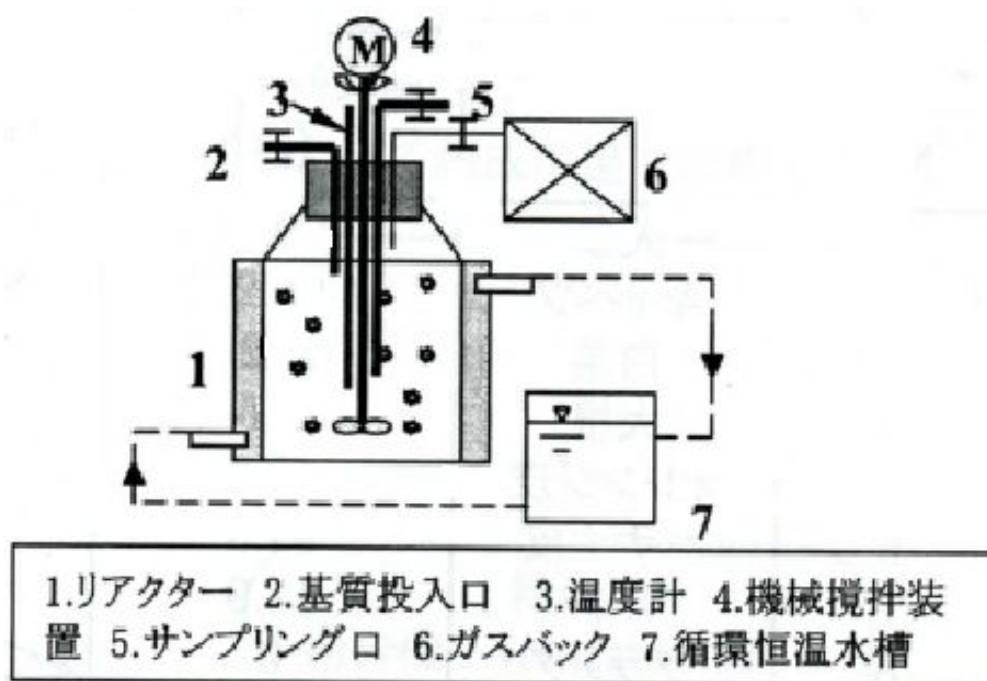


図 3-8 メタン発酵実験装置

### 3) 実験及びその結果

#### 3-1) コンポスト化実験

装置に 30 k g の原料を充填し、10 L / 分で空気を供給し 50 日間のコンポスト化を行った結果は以下の表 3-7、および図 3-9 のとおりである。表では、その開始時の成分と量、50 日後の成分と量を示す。

表 3-7 コンポスト化実験の開始時と終了時

|      | 開始日(kg) | 50日後(kg) | 残留率(%) |
|------|---------|----------|--------|
| 水分   | 21.3    | 14.1     | 66     |
| 炭水化物 | 6.9     | 3.8      | 55     |
| 蛋白質  | 1.1     | 0.5      | 45     |
| VTS  | 8.0     | 4.3      | 54     |
| 灰分   | 0.6     | 0.6      | 100    |
| 合計   | 30.0    | 19.0     | 63     |



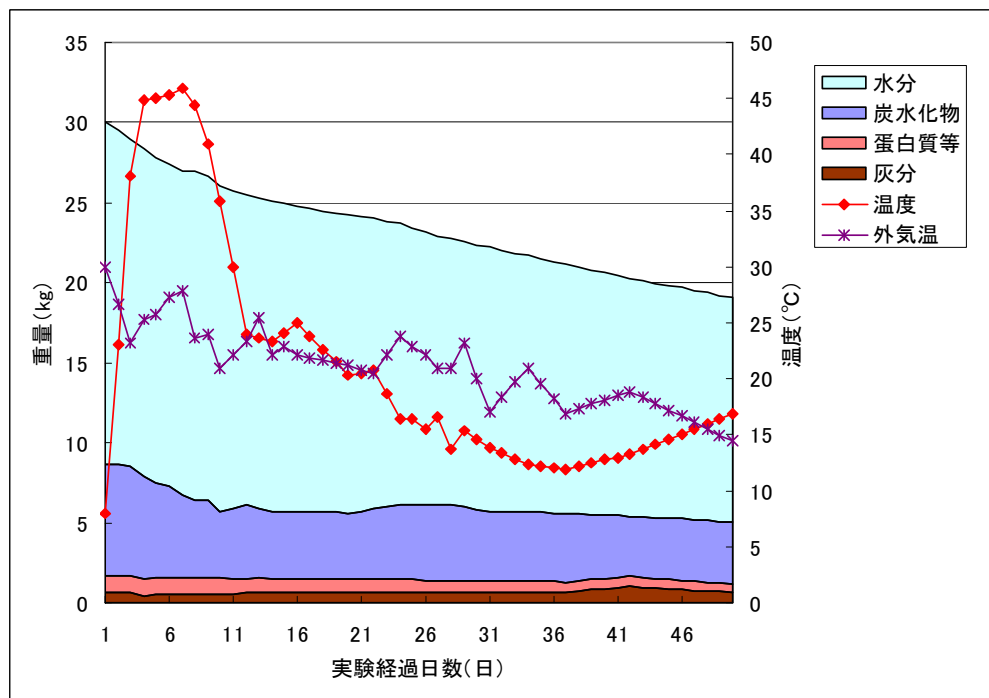


図 3-9 コンポスト化実験による成分変化

実験 1 における微生物反応は、運転開始後 1 週間は活発で、内部温度は 45℃ に到達した。一般にコンポスト化で求められる 65℃ にはならなかったが、この規模の実験装置では一般的な値と考える。この時期に炭水化物が急激に減少し、発熱エネルギーに転換していたと考えられる。2～3 週間目以降では熟成発酵に入ったと見られ、穏やかな分解で推移した。この間温度も上昇していないが、水分だけは一定に減少する。供給空気により水分蒸発が続いたと考えられる。

### 3-2) メタン発酵実験

装置に毎日 1 回原料を投入しながら 45 日間 55℃ メタン発酵を行った結果は以下の図 3-10 に示すとおりである。安定運転時の 30 日目における処理状況を、原料との比較で示したのが表 3-8、および図 3-11 である。

実験では運転立ち上げを 150 g -wet/日の 2 倍希釈原料投入で開始し、3 日目からは 200 g -wet/日とし、バイオガスの発生を見ながら負荷をかけてゆき、3 週間目からは予定の 300 g -wet/日 (COD 負荷で 4.5kg/m<sup>3</sup>・日) の運転を行なった。運転は一日一回の給餌で汚泥の返送を行なって実施した。比較的順調な立ち上がりで、30 日目には完全に安定した運転が行なえたのでサンプリングした。

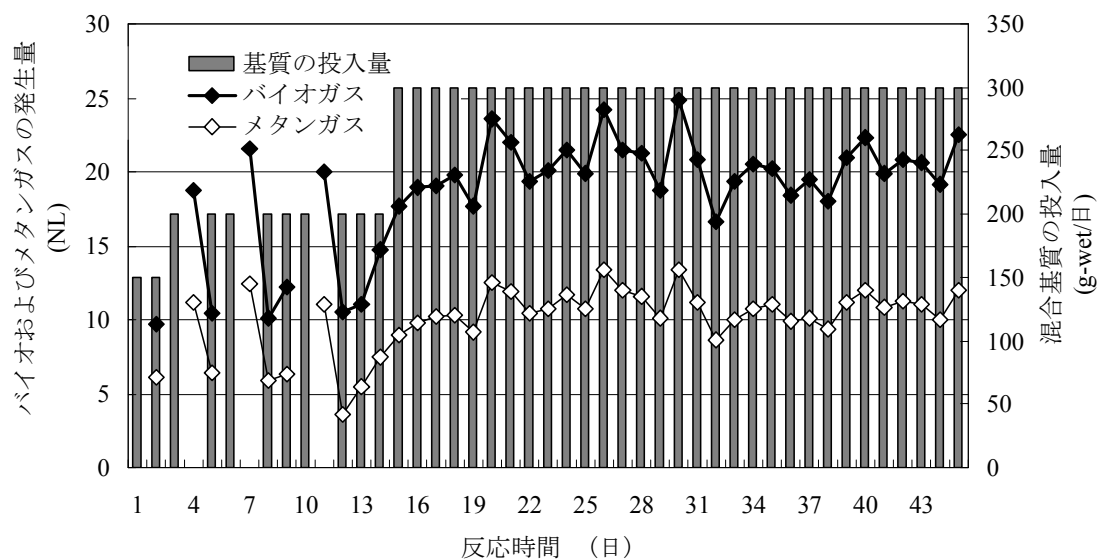


表 3-8 メタン発酵実験における成分変化

|       | 原料(g/kg-wet) | 残渣(g/kg-wet) | 残留率  |
|-------|--------------|--------------|------|
| 蛋白質   | 18.0         | 6.3          | 35%  |
| リグニン  | 11.5         | 5.5          | 48%  |
| セルロース | 38.4         | 9.8          | 26%  |
| デンプン等 | 65.1         | 16.0         | 25%  |
| VTS   | 133.0        | 37.6         | 28%  |
| COD   | 150.0        | 43.0         | 29%  |
| 灰分    | 12.0         | 12.0         | 100% |

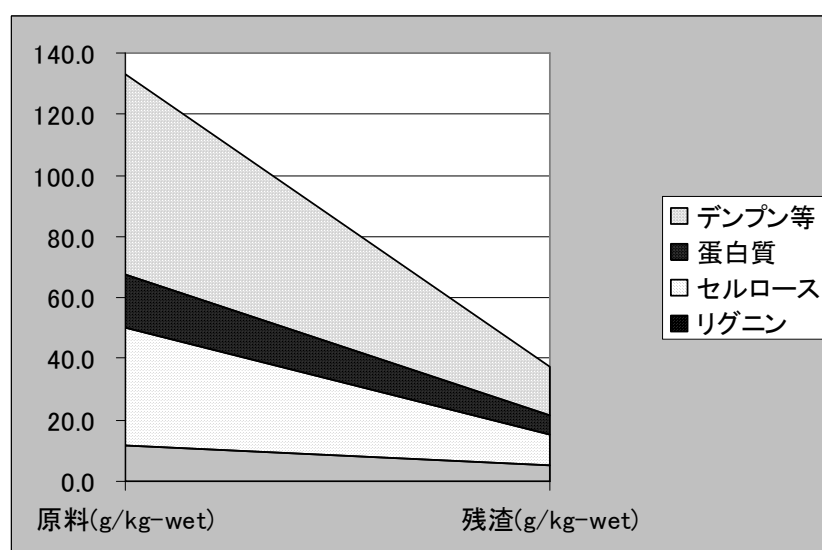


図 3-11 メタン発酵実験による成分変化

メタン発酵分解実験終了後、発酵残渣を遠心脱水で濾液とケーキとに分離した。このときの成分の移動を以下の表 3-9 に示す。

遠心脱水は 3,000rpm で 10 分間行なって、80%水分のケーキが原料の 19%採取できた。濾液には 1.1%の有機分が残ったが、これは無薬注遠心脱水での濾液性状としては一般的である。ケーキ水分率も実際のプラントにおいても、砂などの異物が入らない場合は 80%程度水分は含む場合が多い。

表 3-9 発酵残渣消化液の遠心脱水結果

|        | 消化液原液 | 濾液   | ケーキ  |
|--------|-------|------|------|
| 量比     | 100   | 81   | 19   |
| 水分(%)  | 95.1  | 98.4 | 80   |
| TS(%)  | 4.9   | 1.6  | 20   |
| VTS(%) | 3.8   | 1.1  | 15   |
| 灰分(%)  | 1.1   | 0.5  | 5    |
| N(%)   | 0.26  | 0.25 | 0.36 |
| p(%)   | 0.04  | 0.02 | 1.1  |
| k(%)   | 0.14  | 0.14 | 0.14 |

#### 4) 実験結果考察

コンポスト化反応実験では一般に必要とされる温度 70℃まで、原料温度が達しないなど、やや充分なコンポスト化ができたとはいえない面があるが、50 日掛けて、ほぼこれ以上続けても成分変化は現れないところまでコンポスト化を行っている。空気流通や水分調整を考慮し混合された籾殻や紙ごみは、コンポスト化での分解率は悪いため、全体の有機物減少率が見かけ上小さくなっていることは否めない。

コンポスト化の減量は、有機分の分解減少とそれに伴う水分の減少とで起こる。蛋白質残留率 50%、炭水化物残留率 53%が分解せずに残った。これらは、農地に使用されるとき、どのように分解されながら、保有する栄養塩類を放出するかが問題となる。土中の水分と接したとき、直ぐに加水分解して、高濃度の BOD 成分を出すようでは、植物の必要とする溶存酸素まで奪うので根腐れを引き起こす。50 日間のうち 35 日間程度は水分のある状態で有機物の酸化がほとんど行われていないので、そう簡単には根腐れの原因になるとは考えられないが、有機物濃度が高い。

有機物濃度が高くても、それがリグニンやセルロース分であるなら、簡単には BOD 成分に変わることはない。また、このように変化しない有機物が一部フミン質となっているなら、それもコンポストとしては使用できる。

コンポスト化が本当の製品製造として成立するなら、この減少率の小ささも製品製造量拡大と解釈もできるが、製品として欠陥である場合は環境負荷増大となる。

メタン発酵での有機物の残留率は蛋白質で 35%、炭水化物で  $(5.5+9.8+16)/(11.5+38.4+65.1) = 31.3/115 = 27.2\%$  となり、コンポスト化での残留率よりはるかに小さい残留率となる。減少した部分はバイオガスとなったと考えられ、これはエネルギー利用できる。発生したバイオガス量は 300 g の投入に対し約 20L であった。バイオガス中のメタン濃度は約 55% 程度であるが、これは原料が炭水化物主体であったことを考えると納得できる数値である。また、バイオガス化した量は VTS で  $133-37.6=95 \text{ g/kg-湿式}$  である。300g 原料では 28.5 g となり、炭水化物リッチの原料としてバイオガス発生量を 790L/kg で考えると、 $790 \times 0.0285 = 22.5 \text{ L}$  となり、ほぼ実験数値となっており正常に運転されたことが分かる。

消化液はこの後脱水工程に送られて、液分と脱水ケーキとに分割される。実験では消化液を遠心分離にかけると表 3-8 のように、4:1 に分かれた。残留した有機物質のうちセルロースやリグニンを中心とする固形部分がケーキとして排出される。従ってケーキは見た目繊維分が多くなるが、これは本当に微生物分解しにくいものだけが残っている。直接コンポスト化ではそれ以外のものも多く分解できず残るため繊維分が目立たないだけということが分かる。

この脱水ケーキについては、これを再度コンポスト化の熟成工程に送り込み、完熟コンポストとして利用する場合が多い。ここでは、易分解物は多く残っていないので熟成発酵といっても、アンモニア等の還元性物質の排除や酸化さえ出来れば、植物に害を与えることはなく栄養塩類を供給できるコンポストの製造が可能になる。尚、実験の結果では、脱水ケーキの栄養塩類は脱水操作により濾液とに栄養塩類は分かれるが、カリウムや窒素は同じ比率で分かれ、磷については脱水ケーキ側に多く分布しており、肥料としても有用であることが分かる。このコンポスト化では好気性の維持が簡単であるためか、直ぐにカビの繁殖が始まる。微生物分解できなかった残りのセルロースやリグニンの分解が始まったと考えられる。

#### 3.3.4 コンポスト比較実験（実験 2）

固形有機物原料を直接コンポスト化してできたコンポストと、メタン発酵して其の残渣をコンポスト化してできたコンポストの比較を行なった。固形有機物原料としては生ごみを用いて、その「ストラクチャー」としては微生物反応に関与しない軽石を添加してそれぞれのコンポスト化をおこなった。

## 1) 原料

原料は都市ごみの組成を参考に、人工生ごみを調整して用いたもので、実験1で使用したものと同一基準<sup>7)</sup>で作成している。生ごみの成分を表3-10に示す。

表 3-10 生ごみの成分分析  
結果

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| 水分(%)                              | 81.5 |
| 有機物*(%)                            | 94.3 |
| TC*(%)                             | 49.0 |
| TN*(%)                             | 2.80 |
| C/N 比                              | 17.5 |
| アンモニア態窒素 (mg/100gDM)               | 30.6 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *(%) | 0.53 |
| K <sub>2</sub> O*(%)               | 1.36 |
| CaO*(%)                            | 0.17 |
| MgO*(%)                            | 0.12 |
| pH                                 | 4.48 |
| EC (mS/cm)                         | 1.87 |
| 腐植酸濃度*(%)                          | 14.0 |
| CEC(meq)                           | 39.8 |

\*DM 中

## 2) 実験装置と分析

実験装置として、コンポスト化には11Lのコンポスト化実験装置、メタン発酵には3Lのメタン発酵実験装置および1Lの発酵残渣コンポスト化装置の3台を準備した。各実験装置図を図3-12、3-13に示す。

各分析項目における分析方法は、水分、粗灰分、pH、EC、アンモニア態窒素、硝酸態窒素およびCECについては堆肥等有機物分析法<sup>10)</sup>に、腐植酸、カリウム、カルシウムおよびマグネシウムについては肥料分析法<sup>11)</sup>に、全窒素およびATP濃度は下水試験方法<sup>8)</sup>に従って行った。

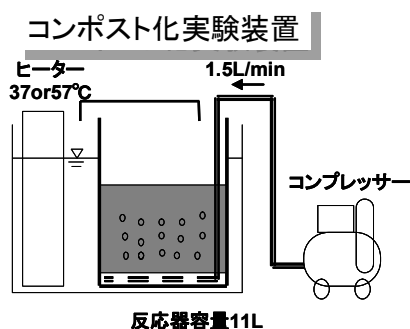


図 3-12 直接コンポスト化

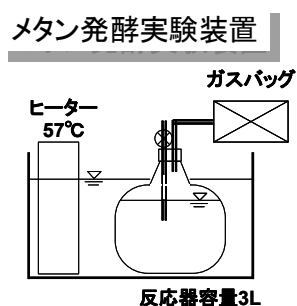
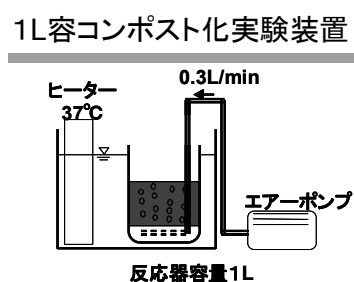


図 3-13 メタン発酵+コンポスト化



## 3) 実験

生ごみの直接コンポスト化実験は、生ごみ5kgと軽石1kgを混合したものを実験材料に用いて46日間運転した。運転は、反応を好氣的に保つため1日1回全体を攪拌し、また乾燥を防ぐため適宜水を加え、水分率が40~60%程度を保持できるようにした。コンポスト化実験装置は今回容量が小さいため、外部加温により温度維持するものとし、実験開始から10日目までは57℃とし、11日目以降は

37° Cとなるように設定した。サンプリングは3日毎に約15gを採った。

メタン発酵実験では、表3-10に示す生ごみを2倍希釈した生ごみを使って実施した。但し立上げのときは、希釈水の代わりに下水汚泥を等量混合したものを使用した。その後は2倍希釈生ごみを基質とする1日1回給餌でCOD負荷率1.81(g-COD/L/d)から3.62(g-COD/L/d)の範囲で運転した。また、pHが7.5付近に保たれるように、状況に応じて4M水酸化カルシウム水溶液を添加した。立ち上げから40日経過後、続くコンポスト化実験に用いる残渣の貯留を開始した。さらに40日経過後、残渣を3,500rpmで10分間遠心分離し、得られた固形物のうち700gと軽石150gを混合し、1L容コンポスト化実験装置で7日間コンポスト化した。反応器は恒温水槽内に設置し、メタン発酵実験装置は57° C、1L容コンポスト化実験装置は37° Cの定温とした。

以上により完成した直接コンポスト化によるコンポスト（Kコンポスト）とメタン発酵残渣をコンポスト化したコンポスト（以下Mコンポスト）の2種類につきコマツナ栽培試験を実施した。

栽培試験は堆肥等有機物分析法に従い、基準栄養塩だけの対象区、対象区にKコンポストを加えた場合、対象区にMコンポストを加えた場合につき、表3-11に示す施肥設計で行った。

表3-11 施肥設計

|  | 対象区    | Kコンポスト試験 |     |     | Mコンポスト試験 |     |     |
|--|--------|----------|-----|-----|----------|-----|-----|
| コンポスト量<br>(g-wet)  | 0.0    | 2.0      | 5.0 | 7.5 | 3.3      | 5.0 | 9.9 |
| N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O (mg) | 各 25.0 |          |     |     |          |     |     |

市販栽培用土壌500mLあたり

#### 4) 実験結果および考察

##### 4-1) 生ごみの直接コンポスト化

コンポスト期間を通じ重量減少率は85.7%、有機物分解率は70%であった。有機物は21日目までに56%が分解し、それ以後の分解は緩やかであるため、コンポスト化の一次発酵はおよそ21日目までであったと考えられる。ECは材料投入から9日目までに、初期値の1.87mS/cmから3.17mS/cmまで上昇し、その後は3.50mS/cmから4.00mS/cmの範囲で一定となった。C/N比は初期の17.5から実験期間を通じて徐々に減少し、最終的には10.2となった。全窒素の減少より全炭素の減少が大きい傾向が続くわけで、タンパク質以外の分解量が大きいこ

と、窒素は分解してもかなりは残ることを示唆する。腐植酸濃度は 15 日目までに 14%から 22%まで増加し、最終的に 24%に達した。腐食酸濃度が増加した時期は易分解性有機物が豊富な一次発酵の初期であり、ATP 濃度が増加した時期と重なっていた。腐植酸の生成が微生物活動に起因することを示している。

#### 4-2) メタン発酵残渣を用いたコンポスト化

メタン発酵での有機物分解率は 91%であった。残渣を脱水したところ、重量パーセントで約 88%の水分が除去された。これをコンポスト化したが、主に水分の蒸発およびアンモニア態窒素の揮散が起こったことが確認できる。有機物については、コンポスト化ではほとんど変化しなかった。これは、有機物のうち易分解性のものは、メタン発酵基質として既に消費されてしまっていたためと考えられる。

#### 4-3) 成分比較

K コンポスト製品および M コンポスト製品の成分分析結果ならびに生ごみコンポストの品質推奨基準<sup>12)</sup>を表 3-12 に示す。K コンポスト製品と M コンポスト製品の間で顕著な差異が表れている成分は、腐植酸濃度および EC である。腐植酸濃度は、K コンポスト製品で 24%含まれていたのに対し、M コンポスト製品ではわずか 9%であ

表3-12 コンポスト成分分析結果および  
生ごみコンポスト品質推奨基準

|                                    | Kコンポ<br>スト製品 | Mコンポ<br>スト製品 | 品質推奨<br>基準値 <sup>12)</sup> |
|------------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|
| 水分                                 | 45.7         | 22.2         | 50以下                       |
| 有機物*(%)                            | 67.8         | 37.2         | 40以上                       |
| TC*(%)                             | 40.0         | 36.0         | -                          |
| TN*(%)                             | 3.93         | 3.05         | 25以上                       |
| C/N比                               | 10.2         | 12.0         | -                          |
| アンモニア態窒素<br>(mg/100gDM)            | 120.4        | 91.0         | 2以上                        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *(%) | 1.26         | 2.56         | -                          |
| K <sub>2</sub> O*(%)               | 3.24         | 2.19         | -                          |
| CaO*(%)                            | 0.40         | 1.22         | -                          |
| MgO*(%)                            | 0.29         | 0.78         | 8.5以下                      |
| pH                                 | 9.26         | 8.96         | -                          |
| EC (mS/cm)                         | 3.39         | 1.23         | -                          |
| 腐植酸濃度*(%)                          | 24.1         | 9.1          | -                          |
| CEC(meq)                           | 81.1         | 83.2         | -                          |

った。また、EC については、コンポストで 3.39mS/cm と高く、M コンポスト製品では 1.23mS/cm と低かった。

#### 4-4) 栽培試験に対するコンポスト品質の影響

栽培試験の結果を表 3-13 に示す。K コンポスト製品施用区では施肥量が増加するにつれ発育が悪くなる傾向をみせた。M コンポスト製品施用区ではコンポスト製品施用区よりも良好な発育を示した。

表3-13 栽培試験結果

|              | 対象区  | Kコンポスト製品 |      |      | Mコンポスト製品 |       |       |
|--------------|------|----------|------|------|----------|-------|-------|
| コンポスト量(g)    | 0.0  | 2.0      | 5.0  | 7.5  | 3.3      | 5.0   | 9.9   |
| 発芽率(%)       | 100  | 97.5     | 100  | 97.5 | 100      | 100   | 100   |
| 生体重(g)       | 8.98 | 9.21     | 7.14 | 6.79 | 13.14    | 14.94 | 16.40 |
| 対象区に対する割合(%) | 100  | 103      | 80   | 76   | 146      | 166   | 183   |

この結果に影響を及ぼした因子としては、Kコンポスト製品とMコンポスト製品で顕著な差異が表れていた、腐植酸濃度およびECが考えられる。

腐植酸は多く含まれるほど植物の生育には有利なはずである。腐植酸は安定した物質であるため、直接的に植物の生育に関係するとは考えられない。従って主要な原因はECであろうと考えられる。ECは塩分濃度を間接的に表現する。Kコンポスト製品にはMコンポスト製品にくらべ多量の塩分が含まれており、それが植物試験における発育不良に影響したと考えられる。そこで、食品成分データベースの情報および本実験で調整した生ごみ原料の配合割合を基に塩分濃度を試算した結果、塩分濃度は生ごみで0.47%、Kコンポストで1.12%、Mコンポストで0.33%であった。EC値に含まれる各成分には、コンポスト化過程において減少する窒素類などもあるが、多くはコンポスト化過程およびメタン発酵過程で増減のない成分であるが、Mコンポスト製品では途中脱水処理があるため、ここで多くの塩分が濾液側に出たと考えられ、結果Mコンポストには塩類が少なくなった。

尚、カチオン交換容量(CEC)と腐植酸の関係を調べた。図3-14に示す。コンポスト化過程においてCECの増加が腐植酸濃度の増加に比例するということが分かる。しかしMコンポスト製品のCECおよび腐植酸濃度は、コンポスト化過程におけるCECと腐植酸の関係から大きくはずれている。したがって、Mコンポスト製品のCECは、

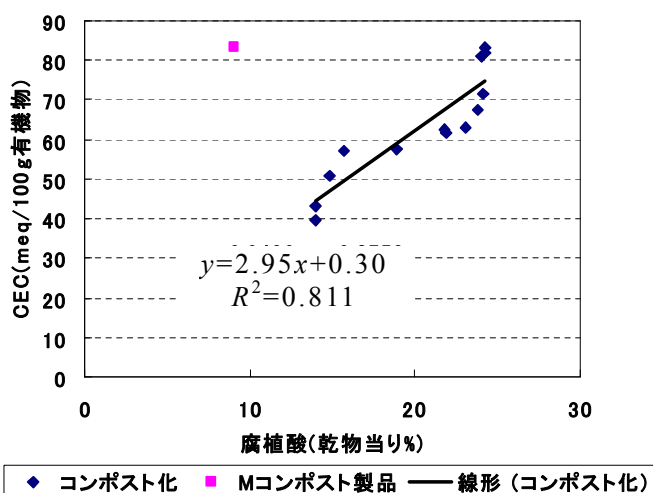


図3-14 腐植酸濃度とCECの相関図

K



腐植酸由来ではないと考えられる。

腐植酸は動植物が微生物などによる腐敗作用により分解・合成が繰り返され、さらに空気中の酸素により緩慢な酸化分解を続けることで、これ以上変質しない安定した形に変化したものとされる。色も黒褐色でベンゼン環など共役二重結合をもち、三次元網目状構造となりやすく、イオン交換能力も持ち始める<sup>14)</sup>。従ってKコンポスト化で腐食酸濃度とCECが相関を見せるのは自然である。一方、Mコンポストは別のやりかたで結晶構造を獲得し、結果的にKコンポストと同等のイオン交換能力を得るに至ったということになる。

### 3.3.5 微生物反応における生産物とその特徴

コンポスト化とメタン発酵は、このように同じ原料について反応させることにより、その違いが大きく出てくる。生産物の違いを検討する。

#### 1) 熱エネルギー

コンポスト化では分解有機物は熱エネルギーに変わり、原料の温度を上げるとともに、水分蒸発を促進し、生産物の水分を低くする。このことで、原料の間の空気流通が良くなりコンポスト化が順調に行なわれるとともに、製品としても、取扱い性の良いものが出来上がる。逆に、温度が上がらなければ、水分の減りも少なく、空気の流通も悪いままで、製品からは腐敗臭が抜けず、コンポストになるどころか、最悪の廃棄物となる可能性もある。そして実際のコンポスト製品はこの上質なものと最悪の商品まで存在し得る。しかしながらどのような品質測定をすれば、どの程度良いかという採点の基準も明確にはない現状にある。本実験ではこの良質コンポストと悪質コンポストの中間的な発酵であったと考えられる。製品水分率は原料より悪いが、全体では減量している。減量した有機物は酸化して熱エネルギーに変わった部分もあるが、かなりの部分が有機性ガスとして逃げていったと推測はされる。

メタン発酵では、バイオガスの発生となり、これは何らかの装置で利用することで、熱エネルギーの利用が図れる。最も一般的な利用は発電である。小型のエンジン発電でも熱効率 30% 程度の発電ができ、そのとき発生する熱も利用できれば総合的なエネルギー効率は更に上がる。ただ、これらは周囲にどれだけ電力や熱を利用できる施設があるのかにより価値が異なる。自動車燃料に使うような場合は、メタンだけの気体にして更に圧縮してタンクに充填して利用する。このようにして得られる燃料は需要先まで搬送することで、周囲の施設状況に影響されないが、このための施設建設費は高価であるため、未だ普及するまでには至っていない。

製品バイオガス品質としてのガス成分は大体一定した品質のものが得られる。

原料が変わっても大きくは変わらない。プラント運転においてメタン発酵を失敗すれば酸腐敗が起こりプラント運転が継続できなくなりバイオガスは発生しない。メタン発酵は運転が継続できている限りはほぼ一定品質のバイオガスを得ることが出来る。この点は製造物評価を行うにあたってコンポスト化と大きく異なる点である。

コンポスト化における熱エネルギーの意味は上述のように、製品を乾燥して、良い製品コンポストを作るうえで必要な条件と言えるが、同時に有機物の再資源化における水分障壁を取り除く点に意義を認めることも出来る。例えばドイツでは、ある発熱量以上の原料についてはこれを焼却してもエネルギー再生利用と認定されるが、それ以下の発熱量の原料を燃焼するとこれは単なる廃棄物処理となり、資源循環と見なされない時期があった。そのとき、有機物原料水分をコンポスト化で発熱脱水を行い、全体の発熱量を上げてから焼却発電するプラントがいくつかできた。この方式は「機械生物処理法（Mechanical Biological Treatment）」と呼ばれる。ここではコンポスト化は全く熱エネルギー取り出しのための一つの手法である。この観点からなら、コンポスト化とメタン発酵の生産物としての熱エネルギーを比較することが可能になる。

以下に実験 1 の結果を使って、メタン発酵とコンポスト化における熱エネルギー的評価を試みる。

直接コンポスト化におけるエネルギー的側面の経緯を考えるために、コンポスト化の経緯を表す表 3-7 に発熱量をいれてみる。又、機械生物処理法を考えるために、コンポスト化原料 30 k g -wet のところに、プラスチックが 10 k g -wet 混合されていた場合を考えて見ると、以下の表 3-14 となる。

表 3-14 コンポスト化及び生物機械的処理法での発熱量

|               | 単位発熱量 | 重量      | 発熱量     | 重量       | 発熱量      |
|---------------|-------|---------|---------|----------|----------|
|               | MJ/kg | 開始日(kg) | 開始日(MJ) | 50日後(kg) | 50日後(MJ) |
| 水分            | -2.4  | 21.3    | -52.1   | 14.1     | -34.3    |
| 炭水化物          | 17.0  | 6.9     | 117.3   | 3.8      | 64.6     |
| 蛋白質           | 24.0  | 1.1     | 26.4    | 0.5      | 12.0     |
| VTs           |       | 8.0     |         | 4.3      |          |
| 灰分            | 0.0   | 0.6     | 0.0     | 0.6      | 0.0      |
| 有機物合計         |       | 30.0    | 91.6    | 19.0     | 42.3     |
| 有機物発熱量(MJ/kg) |       |         | 3.1     |          | 2.2      |
| プラスチック        | 33.0  | 10.0    | 330.0   | 10.0     | 330.0    |
| 全合計           |       | 40.0    | 421.6   | 29.0     | 372.3    |
| 全発熱量(MJ/kg)   |       |         | 10.5    |          | 12.8     |

このコンポスト化では、原料有機物は減少したが、水分比率は変わらず、相対的に灰分比率は高まり、発熱量を 92MJ から 42MJ に落とし、単位発熱量その

ものも 3.1MJ/kg から 2.2MJ/kg に落としている。従って、この有機物だけをみる限りはコンポスト化によるエネルギー的なメリットは何もない。しかし、ここに 33MJ/kg の単位発熱量をもつプラスチックが 25% 混合されていた(10kg-wet のプラスチックが加わっていた)場合を考えてみる。プラスチックはコンポスト化により何の影響も受けないため、発熱量全体は 422MJ から 372MJ へと落ちるが、混合体の単位発熱量は 10.5MJ/kg-wet から 12.8MJ/kg-wet に上昇する。このことにより、原料全体の燃料としての適性は上昇する。しかし、結局熱量総量は減少しているわけで、エネルギー利用したとは言い難い。

一方メタン発酵での熱エネルギー発生はバイオガス量で測定される。実際の効率はこの後何に利用されるかで異なってくる。コージェネレーションで電力と熱の同時利用が出来れば、バイオガスの熱エネルギーの 70 とか 80% のエネルギー利用が可能になる。発電だけなら小型の発電機でも 30% のような高効率発電が可能になる。

メタン発酵では水分が原料にいくらあろうと、ガス体にはその飽和水分しか水分を含まないため、エネルギー利用し易い。取り出せるエネルギー量は、コンポスト化のときと同じ量で考えると以下ようになる。

150 g-wet の原料につき 20NL のバイオガスが生じたことから 30kg-wet の原料については 4,000L バイオガスが得られ、この発熱量を 21MJ/Nm<sup>3</sup> とすると、

$$4\text{Nm}^3 \times 21\text{MJ}/\text{Nm}^3 = 84\text{MJ}$$

になる。この値は表 3-14 で示す、水分の多い有機物の燃焼時点での発熱量 91.6MJ そのものに近い値で、水分を持ち出さないエネルギー原料がどれだけ有利かを如実に示している。

尚、機械生物処理法の利用は、ここで述べた乾燥機能から、近年、埋立てのための前処理機能へとシフトしており、其の場合は水分蒸発能力が問題ではなく、腐敗性有機物の分解能力が問われるようになる。

## 2) コンポスト

実験 1 では、直接コンポスト化で得られたコンポストは 30kg 原料について 19kg、蛋白質 0.5kg、炭水化物 3.8kg、灰分 0.6kg、全固形分 4.9kg となる。メタン発酵では、表 3-9 に示す脱水分離によって濾液とケーキが得られ、熟成発酵を経てケーキはコンポストとなる。熟成過程で、少量水分蒸発や有機物揮発も一部起こるが、それを無視して、この値を 30kg 原料、メタン発酵原料としては 60 kg とすると、そこから得られたケーキは表 3-15 に示されるようになる。

遠心分離ということで水分は 80% と高めであるため、熟成により更に減量される。ここ表 3-15 ではメタン発酵残渣の成分はそのままにして、水分が直接コンポスト化と同じ 74.2% となった場合の各成分量をそのコンポストとして記

載してみた。

表 3-15 メタン発酵残渣のコンポスト化

|          | 消化液原液 | 濾液   | ケーキ  | コンポスト |
|----------|-------|------|------|-------|
| 量比       | 100.0 | 81.0 | 19.0 |       |
| 量(kg)    | 60.0  | 48.6 | 11.4 | 8.9   |
| 水分(%)    | 95.1  | 98.4 | 80.0 | 74.2  |
| TS(%)    | 4.9   | 1.6  | 20.0 | 25.8  |
| TS量(kg)  | 2.9   | 0.8  | 2.3  | 2.3   |
| VTS(%)   | 3.8   | 1.1  | 15.0 | 19.1  |
| VTS量(kg) | 2.3   | 0.5  | 1.7  | 1.7   |
| 灰分(%)    | 1.1   | 0.5  | 5.0  | 6.7   |
| 灰分量(kg)  | 0.7   | 0.2  | 0.6  | 0.6   |
| N(%)     | 0.3   | 0.3  | 0.4  |       |
| p(%)     | 0.0   | 0.0  | 1.1  |       |
| k(%)     | 0.1   | 0.1  | 0.1  |       |

結局メタン発酵残渣コンポストは量で 8.9kg-wet、蛋白質と炭水化物を合わせた VTS で 1.7kg、灰分 0.6kg となる。灰分以外はいずれも直接コンポスト化のコンポストの半分程度の値となり、生産量は 19 : 8.9 で直接コンポスト化の半分以下となる。

このような関係は実験 2 でも同じである。

原料生ごみの全固形分中の有機物 94%（無機分 6%）は、直接コンポスト化での有機物分解率が 70%、メタン発酵での有機物分解率は 91%であった。固形分量は、直接コンポスト化で有機分が 28%に減り、無機分との合計で 34%となる一方、メタン発酵では有機分が 8.5%に減り、無機分との合計は 14.5%となる。コンポスト製品の水分は商品としては一定の使い易い値に調整されるので同じ水分とするなら、この全固形分比率に生産量も比例する。K コンポスト生産量 : M コンポスト生産量は 34 : 14.5 となり、メタン発酵残渣コンポスト量は直接コンポスト化の半分以下となる。全固形分中の灰分のなかには溶解塩類も含まれており、其の場合は M コンポスト品では濾液側に流れるものも多いので更に M コンポスト製品量は少なくなる。

直接コンポスト化で出来るコンポスト品（K コンポスト）とメタン発酵残渣をコンポスト化したコンポスト（M コンポスト）ととの施肥効果は、表 3-13 でみたように M コンポスト品のほうが良い結果が得られた。原因は K コンポスト品の塩分濃度が原因と考えられる。ただ、このようなコンポスト品にあっては根周りを避けて散布するとか、自然の状態では数度の降雨により溶解性塩類は

流出するため、大きな問題ではないとも考えられる。しかし、少なくとも本実験では M コンポストが K コンポストに較べ劣るということはない。

コンポストの機能は、植物に栄養を与えることと、状態の良い土壌を用意することといえる。メタン発酵残渣コンポストはそれらの点で見た目繊維質が多く見られ、有機物が少ないとして、今まで我国では必ずしも認められているとは言えない。しかし、欧州では一般的にコンポストとして利用されている。M コンポストはメタン発酵を経由するため、コンポスト化段階では温度は上がらないが臭気は少なく、腐敗性有機分は少なく、作物植物を根腐れさせる心配は少ない。

コンポスト化において温度上昇はその必須条件とされるが、メタン発酵残渣においては既にメタン発酵（高温メタン発酵）そのものにおいて 55℃で 10 日以上を経過しており、図 3-15 に示されるとおり、雑菌などの死滅に対する条件は、原料有機物の直接コンポスト化よりはるかに確実である。実験 1 においても直接コンポスト化では 40℃には到達できなかったが、例えこれが 65℃に到達したとしても表面は常温空気に晒されているわけで、オートクレーブのように全体温度が一定に維持されたメタン発酵槽内部条件には及ばない。まして原料の変動、水分の変動などで変わる一般コンポスト化において、細菌まかせて 65℃温度常時保持するというのは、その操作因子が明確でないかぎり、困難と言わざるを得ない。雑菌に対する条件は明らかに、メタン発酵残渣が優れる。

残渣コンポストの原料は上記脱水ケーキとなるが、既にこれはメタン発酵が終了しているためその発酵においては、臭気も無く、温度も上がらないと推察される。

中長期的な堆肥効果は CEC と考えられる。植物への栄養塩類は陽イオンが多いが、これが大量に来たときは受け止め、足りないときは放出するような土壌にするには、陽イオン交換容量の大きいコンポストは大切である。

イオン交換能力は、ベンゼン環などのしっかりした結晶構造が極性を有することで生まれるが、図 3-14 から K コンポストと M コンポストはその成り立ちが異なることが示唆されている。K コンポストは増加した腐植酸と関係し、M コンポストは腐植酸ではなく、分解せずに残ったリグニンなど植物骨格を構成する結晶構造が関係していると考えられる。腐植酸は微生物体の分解合成が繰り返されるなかで、これ以上変質しなくなった物質（二重結合を有する物質）とされ、それが結晶構造をとればイオン交換能力も獲得すると考えられる<sup>14)</sup>が、その内容はまだ明確ではない。今後の研究に期待したい。

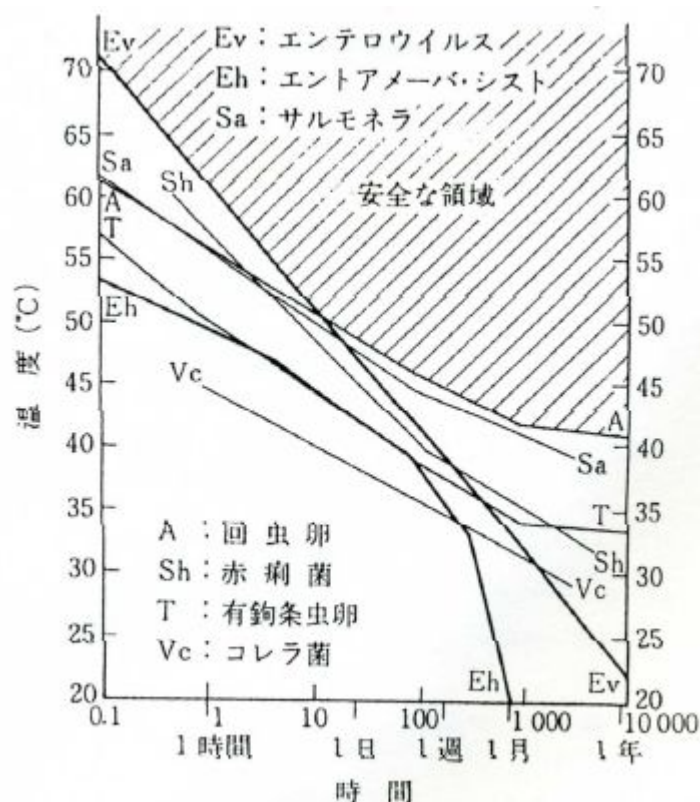


図 3-15 病原菌や寄生虫の死滅温度と曝露時間<sup>13)</sup>

### 3.4 コンポスト化とメタン発酵の利用方法

#### 3.4.1 概要

コンポスト化とメタン発酵は、前節のように同じ原料について反応させることが出来るが、実際には向き不向きがあって、同じ材料を原料として選ぶとは限らない。

コンポスト化では、水分の少ない有機物が好まれる。野菜等は見た目には水分が少ないが、実際は水分 90%を超えるものも多く、通常コンポスト原料としては扱わない。例えば、肉牛、豚、ブロイラーの糞等を扱うことが多い。特に肉牛糞は水分も少なく、栄養塩に富み、しかし、胃腸において充分易分解性有機物は分解しつくしているため、コンポスト化の良い原料となる。乳牛糞は、乳牛の生産目的が乳であるため、水分の補給が充分あり、糞は水分率が高く、コンポスト化にあまり向かない。また、製品に一定の品質を求めるなら原料についても一定の水分率が望まれる。

一方メタン発酵では、水分の多少にかかわらずに微生物分解する原料は利用できる。雑多な原料であっても、主要製品としてのバイオガスの成分に大きな

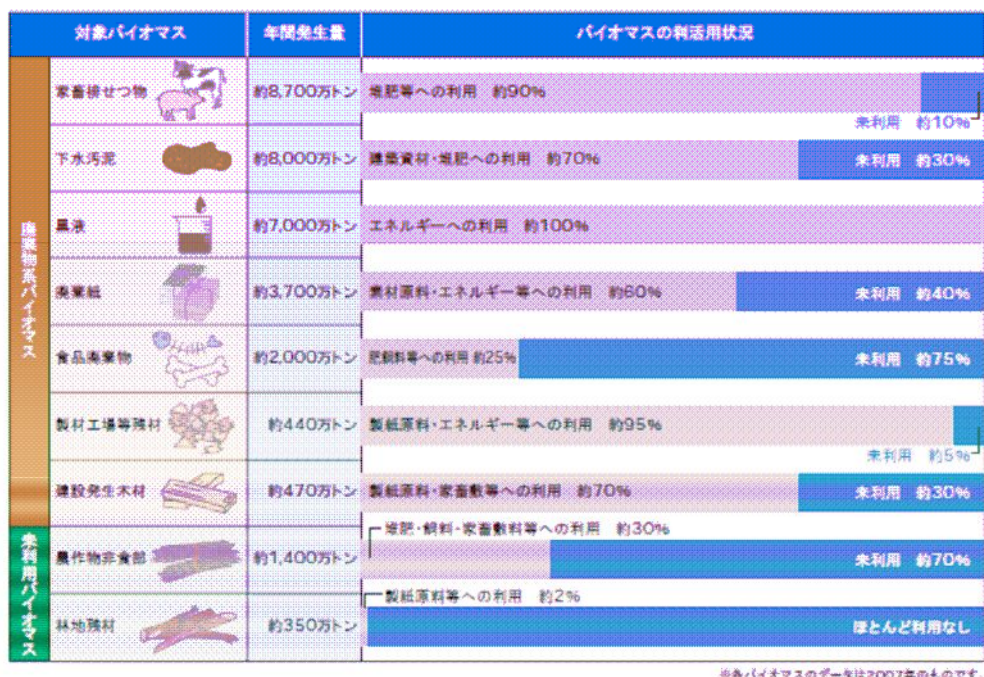
変化は無い。多少メタンの含有率が違ってくる程度である。従って、水分の多い乳牛糞尿や雑多な原料有機物についてはメタン発酵が用いられる傾向がある。

本節ではそのような違いを基に、それぞれの方式の現実的な利用方法と付加価値能力を検討し、同じ有機物を処理する微生物処理法ではあるが、どのような違いがあるのかを明らかにすることを試みる。

### 3.4.2 有機物原料とその利用状況

我国における有機物利用については、近年政府が進める「バイオマス・ニッポン総合戦略」のなかで実行が進められており、2002年よりスタートして現在に至っている。そこでは、わが国にあるバイオマス資源について、以下表 3-16<sup>15)</sup>のようにまとめている。

表 3-16 2005 年 主なバイオマス発生量と利用状況 <sup>15)</sup>



※表バイオマスのデータは2007年のものです。

これらの資源のうち、コンポスト化やメタン発酵といった微生物学的な処理で利用できるものは、木質系以外の、家畜排泄物、下水汚泥、廃棄紙、食品廃棄物、農作物非食用部となる。

このなかで最大の量となるものは、家畜排泄物である。エネルギー源としてこれをみるには水分や無機塩類の含有率が高く問題があるが、環境汚染の原因になっているとするなら、その処理を考えなくてはならない。人の糞尿の量は我国 1 億 2,000 万人につき、一人一日 1kg を排出すると考えると、年間それは 4,380 万トンとなり、家畜糞尿量よりはるかに少ない。しかも人の糞尿は下水



道施設や浄化槽によりほぼ完全に処理する体制が整っているが、家畜糞尿にあっては農地に撒けるため、環境保全として考えられる程の厳密な処理はできていない。この家畜糞尿の内訳は下記の図 3-16<sup>16)</sup> に示すようなバランスになっており、乳牛、肉牛、豚がほぼ同じ比率で存在している。

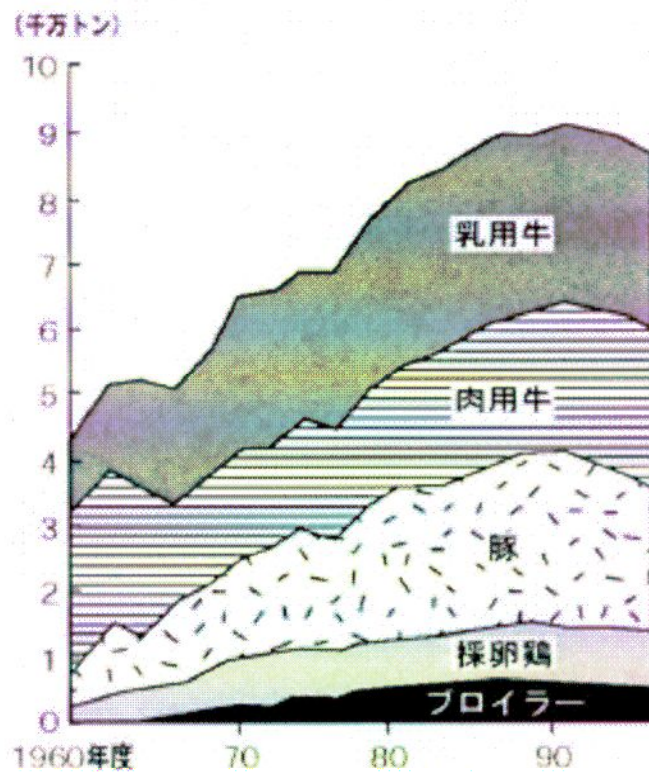


図 3-16 我国での家畜糞尿発生量推移<sup>16)</sup>

現在これらの処理は「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」により管理と利用がなされることになっている。これは不浸透性材料で構成される堆肥板又は貯留槽にて排泄物を保管することを定めており、従来の野積み、素掘り保管を規制した。これにより、大方の施設は堆積式堆肥化装置となった。これをもって90%の利用がなされているという報告となっている。しかし、その堆肥を必要とされる農地に実際に利用できているかという点、耕種農家側が使用している堆肥量に牧草地で散布できる堆肥量を加えると、その量には到達できず、適正な利用というところに問題が残っていることが分かる。

家畜糞尿に対するメタン発酵施設は、わが国では70施設程度であるが、ドイツではこれらに対し2,700箇所のメタン発酵施設数がある。これは、ドイツでは再生エネルギー法が施行され、メタン発酵発電の売りの電力料金が高く設定されたためである。しかしそれ以上に、牧草地がなく輸入飼料により飼育するこ



との多い我国の酪農では、メタン発酵消化液を撒くところがなく水処理が必要なため、その利用がはばまれている。

次に食品廃棄物である。家庭などの一般廃棄物として排出されるものが、ごみの 30%とすると約 1,500 万トン、産廃系食品廃棄物が 500 万トンとなる。これらのうち 500 万トンが再利用されている。産廃系食品廃棄物は、食品リサイクル法があり、年間一定以上の食品廃棄物のあるところは、リサイクル法によりその減量化がもとめられる。リサイクルとして認定された方法は、肥料化、飼料化、メタン発酵である。食品廃棄物のメタン発酵施設は、リサイクル法により増加したとはいえ、未だ 1 万トンにも満たず、ほとんどは肥料化、飼料化である。表 3-17<sup>17)</sup> は 1996 年でのリサイクル状況を示す。

表 3-17 一般廃棄物と産業廃棄物における食品廃棄物再資源化状況（万 t / 年）<sup>17)</sup>

|       | 発生量   | 処分            |          |           |         |           |
|-------|-------|---------------|----------|-----------|---------|-----------|
|       |       | 焼却埋立          | 再生利用     |           |         |           |
|       |       |               | 肥料化      | 飼料化       | その他     | 計         |
| 一般廃棄物 | 1,590 | 1,595 (99.7%) | 5 (0.3%) | —         | —       | 5 (0.3%)  |
| 産業廃棄物 | 340   | 177 (52%)     | 47 (14%) | 104 (31%) | 12 (3%) | 163 (48%) |

(1996 年 厚生省資料より)

一般廃棄物としての食品廃棄物は、そのほとんどは焼却処理されているため 1,500 万トンは未利用となっている。同様のことは廃棄紙についても同じで、3,700 万トンの 40%、1,480 万トンは一般廃棄物として焼却されているものであるため、未利用とされている。一般廃棄物処理でメタン発酵などによる再利用が進めば、これらの利用率は上がることになる。

下水汚泥量は畜産廃棄物に次ぐ量である。下水の有機質のほとんどは人の糞尿であるが、都市の構造によっては事業系の有機排水も含まれており、また濃度が違うこともあって汚泥量は一般廃棄物の 4,300 万トンより多い。下水汚泥の取扱いは国土交通省が行っており、その再利用を促進してきた。メタン発酵は下水処理施設の技術が導入された戦前に既に一緒に我国に入ってきており、メタン発酵の技術的な基本はここで発展してきている。しかし下水汚泥の最終利用まで考えると、汚泥に含まれる無機物の多さなどからメタン発酵だけが減量再資源化できなくなってくる。主流は現在セメント原料化になっている。次の図 3-17<sup>18)</sup>、および図 3-18<sup>18)</sup> を参照されたい。これらにおいて緑農地利用というのが、コンポスト利用を示す。

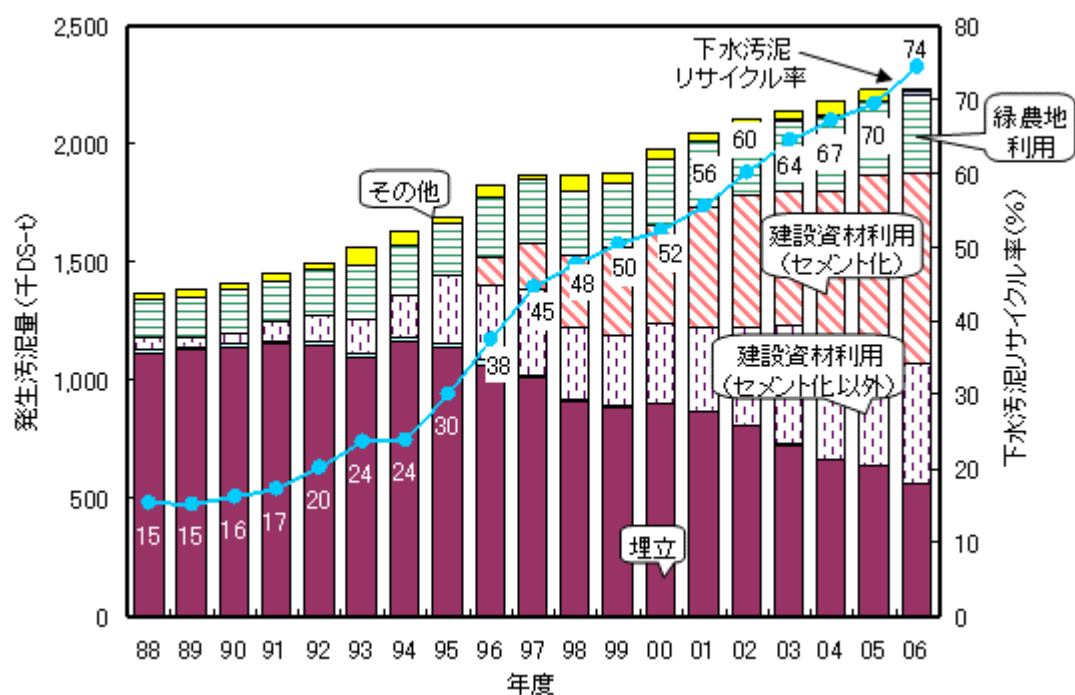


図 3-17 下水汚泥再資源化手法ごとの比率とその変遷<sup>18)</sup>

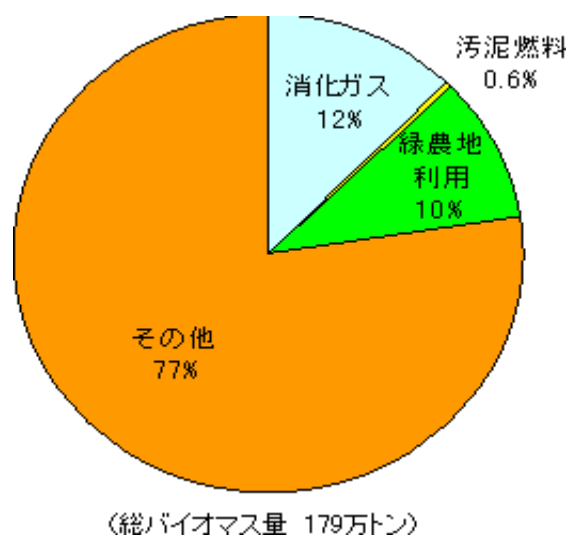


図 3-18 下水汚泥バイオマス量利用方法<sup>18)</sup>

図 3-18 に示されるように、メタン発酵とコンポスト化での下水汚泥利用方法はほぼ、拮抗している。さらに下水汚泥のリサイクル率が 67% と高いといっても、その大半はセメント化や建設資材としての利用で、下水汚泥に含まれる 80% の有機物は再利用されずに無効に処理されている。このようなことから、

下水処理におけるメタン発酵手法の重要性はさらに認識され進められることが望まれる。

農作物非食用部の微生物利用は様々な問題が含まれている。ここでいう農作物非食用部の主体は稲藁、籾殻のことになる。これらは、植物の部位としてはシリカ等の無機物含有比率が高く、腐敗しにくい。即ち微生物分解するところが少ない。

稲藁や籾殻は現在機械化農業により、かえって田圃に返される率が上がっており、それが田圃でのコンポスト利用を減らしている面がある。鋤き込みは稲藁が持ち出した田圃の栄養素をもう一度田圃に返すため肥料効率も良い。表 3-18 ではそのように田圃に返される稲藁や籾殻を再利用とせず、「未利用」としている。

利用されて再び田圃に返される他のルートとして、これをコンポスト化における水分調整剤として利用する方法がある。表 3-18<sup>19)</sup> に原料含水率を示す。

表 3-18 各有機コンポスト原料における含水率 <sup>19)</sup>

|                  | 含水率(%) |
|------------------|--------|
| 乳牛(搾乳牛)糞         | 84~86  |
| 肉牛(肥育牛)糞尿        | 81     |
| 豚糞(肥育豚)          | 75     |
| 食品加工くず*          | 90     |
| 集落排水汚泥<br>(脱水汚泥) | 85     |
| おがくず*            | 25     |
| 籾殻               | 10     |

多くの有機物は、見かけによらず水分含有率が多い。コンポスト化の原料としては空気の流通性や温度上昇を考えてその含水率を 60%程度にコントロールすることが多い。このとき、籾殻は程よい水分調整、間隙剤となる。例えば食品加工くずのように 90%含水率があっても、その原料の 60%分の籾殻を混ぜれば水分 60%にできる。水分 25%のおがくずを用いるなら 86%分の量を入れなければならない。また完成した肥料の質もおがくずを入れるより籾殻のほうが良い。籾殻が容易に入手貯蔵しておけるコンポスト化施設（それにはかなりの広大な敷地が必要だが）では、ほぼ良質なコンポストを製造できる。そうでないところは、有機物原料が季節によりその性状や水分が大きく変動するのに耐えられず、粗悪な堆肥を出荷することになる。

新しく 2007 年から実施されるバイオマス・ニッポン総合戦略では、このよう

な耕種農家と畜産農家の廃棄物交換を進めることを重要施策としている。籾殻を家畜糞尿コンポストに利用し、更にそのコンポストを田圃に帰すような流れを政策としては拡大させる方向にある。

メタン発酵にとっては籾殻の利用はあまり意味が無い。ガス生産の原料としての魅力にやや欠ける。農作物非食用部は稲藁、籾殻のほかには、とうもろこしの茎や豆の茎、芋のつるなどあるが、これらもやはり畑に鋤き込みされることが多く、発酵原料とならない。欧州では、メタン発酵に地域の農産廃棄物を入れてバイオガス発生量を増やす努力がなされている。これは好条件の売電力単価によるところが多い。

以上見てきたように、我国における有機物で微生物処理にまわせる原料量は決して少ないわけではないが、現状ではこれら微生物返還システムが有効に利用されているとは言い難い点が多い。

特に、メタン発酵の原料となっているもので、下水汚泥以外他の有機物はほとんどがコンポストに流れる。水分の多い乳用牛糞尿や食品廃棄物などについては、メタン発酵原料としてもっと積極的に利用されていってもよいと考えられる。

### 3.4.3 コンポスト化とメタン発酵の付加価値能力

コンポスト化もメタン発酵も廃棄することになった有機廃棄物につき、これに価値を付与して再利用しようとするものである。

有機廃棄物を利用するとき飼料化という方法もあるが、これにはその有機物が新鮮でかつその内容がはっきりしたものが求められる。其の限りでは、最も高い値段で引き取られる可能性がある。この場合は特別に微生物を介在させなくても、そのまま利用でき、人間でも食べられる程度が最も良いということになる。液状で供給するとか、乳酸発酵させるとかという加工もあるが、原料の新鮮さ、明確さが最も大事で、原料に依存したシステムである。

コンポスト化もメタン発酵も対象とする有機物にそこまでの特性を求めず、廃棄物としてほぼ価値0のものを再利用するものである。或いは、むしろ廃棄物処理費をもらって、堆肥や電力といった市場価値のあるものを製造することになる。ただ、一般廃棄物か産業廃棄物かというのは、同じ物であっても処理体系が異なるため、処理費も大きく異なる。一般廃棄物には家庭系と事業系があり、事業系（製造プロセスから排出されたものでないもの）でもこれは自治体のごみ処理施設に安価（0～1万円/トン程度）持ち込めるために、民間の処理業者もそれ以上請求できない。一方、産業廃棄物の場合、その処理施設は工場が自ら建設するか、民間の処理会社に委託することになる。この場合、その

施設の建設費も分担して処理費が決まるため、2万円/トン前後の処理費が必要となる。

コンポスト化もメタン発酵も、この処理費用がもらえるか否かで大きく経営条件が異なってくるため、多少原料としては問題があっても高い費用の取れる原料に手を出さざるを得ない場合もでてくる。この場合、コンポスト化の原料は水分条件に厳しく、メタン発酵のほうが原料水分条件は広い。またその原料の種類範囲もメタン発酵のほうが広く受入れ易い。

一方、コンポスト化とメタン発酵での製品価値が問題となる。製品はコンポスト化ではコンポスト（堆肥）であり、メタン発酵ではコンポストとバイオガスが作られ、バイオガスからは電力や車両燃料等が作り出される。

先ず堆肥の価値であるが、以下の図 3-19<sup>20)</sup> にその流通、図 3-20<sup>21)</sup> に取引形態をアンケートで求めたものがある。

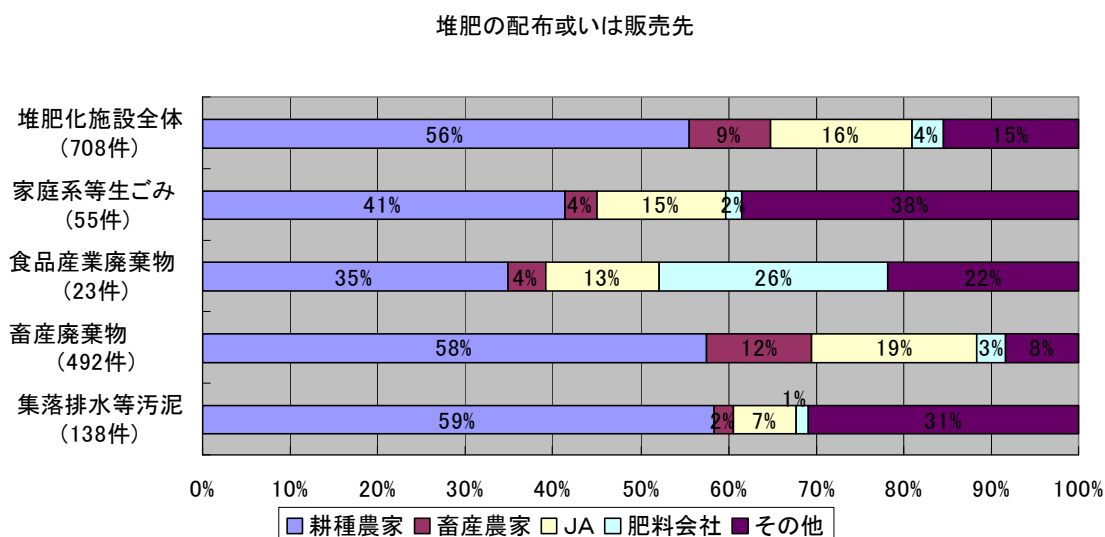


図 3-19 堆肥の配布或いは販売先 <sup>20)</sup>

堆肥の流通はこのように、主に耕種農家と直に行われていることが多い。JAや販売会社といった。広域での取引形態よりも、近隣の耕種農家との直接取引ということを示唆している。堆肥の販売価格が搬送費用により大きく変わらない場合、近隣で持って行ってもらえるところを優先することになる。

図 3-20 では、その堆肥の取引形態を聞いている。全体で言えば、3割が無料配布となっており、持って行ってもらえれば良しということとしている。これは結局原料が廃棄物で、無料で処理できれば良しということに近い。また、主に公共の関与する集排汚泥や生ごみではその傾向が強い。

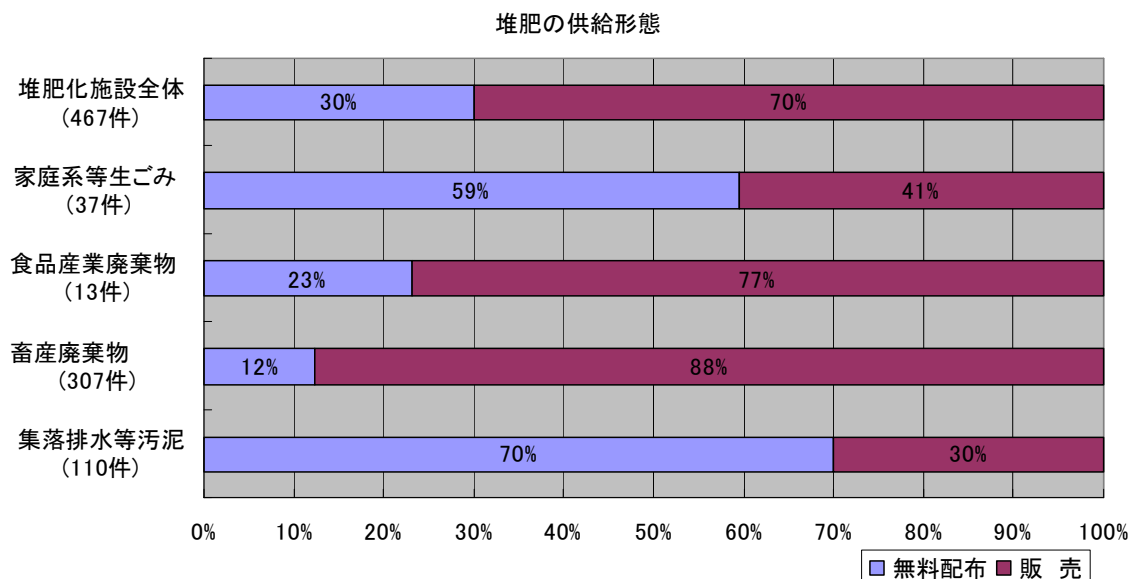


図 3-20 堆肥の取引形態 <sup>21)</sup>

販売されている価格であるが、これも様々で、一回の引取量やどこまで篩ったか等で様々な価格帯をそれぞれの施設が持つ。トン千円程度から 2 万円程度まで幅広く分布する。

次にバイオガスであるが、電力にされる場合と車両燃料では大きく異なる。ただ、車両燃料化はその設備費用が大きく、製品単価だけでは議論できない。

ここでは電力を考える。バイオガスからの電力単価は再生エネルギーであるため一般より高く設定され、8 円～16 円/kWh あたりとなる。

ここである有機物原料につきコンポスト化とメタン発酵を行ったとき、それはどのような価値の違いを生み出すかについて検討する。

原料とその製品を、3.3.3 節で行った実験の場合で考える。

実験では有機物は次のように製品となった。

コンポスト化；30kg の原料から 19kg のコンポスト

メタン発酵；30kg の原料から約 9kg のコンポストと 4,000L のバイオガス

尚、バイオガス 4,000L は 88MJ としているが、ここから電力と熱の両方をどの程度回収できるかで話は変わるが、とりあえずは効率 30% で発電だけを行うとするなら、その電力量は 7.3kWh となる。電力単価を 10 円/kWh とすると、73 円が見込める。

コンポストの単価については上述のように各種あるので、トンあたり 3,000 円（3 円/kg）の場合と 1 万円（10 円/kg）場合と両方考えると、次の表 3-19

となる。

表 3-19 30kg 有機原料からの生産物価値例

| コンポスト単価       | 3 円 / kg | 10 円 / kg |
|---------------|----------|-----------|
| コンポスト化 : 19kg | 57 円     | 190 円     |
| メタン発酵 : 9kg   | 27 円     | 90 円      |
| : 7.3kWh      | 73 円     | 73 円      |
| : 合計          | 100 円    | 163 円     |

このように、両者の生産物の価値は条件によって異なり、その順位は入れ替わる。ここではコンポストが売れる前提であるが、0 円ということもある。その場合、コンポスト化は生産という面ではなんの意味もなく、単に廃棄物処理をするためだけのものとなる。電力の価値にはそのような変動はないものの、設備と維持管理が要求される。

### 3.5 まとめ

コンポスト化もメタン発酵もある施設の大きさを有し、従って、悪臭対策や污水対策も必要に応じて実施されるなら、必要な設備は大きく変わらない。即ちかかる費用も大きく変わらない。

しかし、コンポスト化にあっては、小は家庭の生ごみ処理機から大は地域バイオマス利用の中心施設まで多くの種類の装置があり、その規模に応じて、機械化や環境対策も省くことも出来ている。従って、必要に応じ、大きな施設であっても機械化を省き環境対策を省き滞留時間を短くし、簡易で安価な施設を提供できる状況がある。

一方メタン発酵では、その技術が下水処理汚泥の消化から始まったように、技術基準や施設基準の整ったなかで建設されてきており、当然環境や污水の対策も含まれてくる。原料の施設への有機物負荷も常識的な値は決められており、特別に簡易で安価な施設というものはない。

過去において、農業系のメタン発酵施設で簡易かつ安価な施設が建設され、用をなさなかったことで、メタン発酵そのものの導入が止まったことがあった。メタン発酵の場合メタン化できなければ、発酵槽内は酸腐敗して、プロセスは停止、バイオガスの発生は止まる。明確に失敗が現れる。しかし、コンポスト化でもそのような発酵の失敗はなかったのかといえ、大いにある。ただ、製品はやや腐敗臭がするが使う前に若干寝かせれば使えるとか、施設の失敗が大きく現れないことが多い。そのため、コンポスト化への問題意識は図 3-21<sup>22)</sup>

に示すように製造側にもあるし、図 3-22<sup>23)</sup> に示すように使用者側にもある。

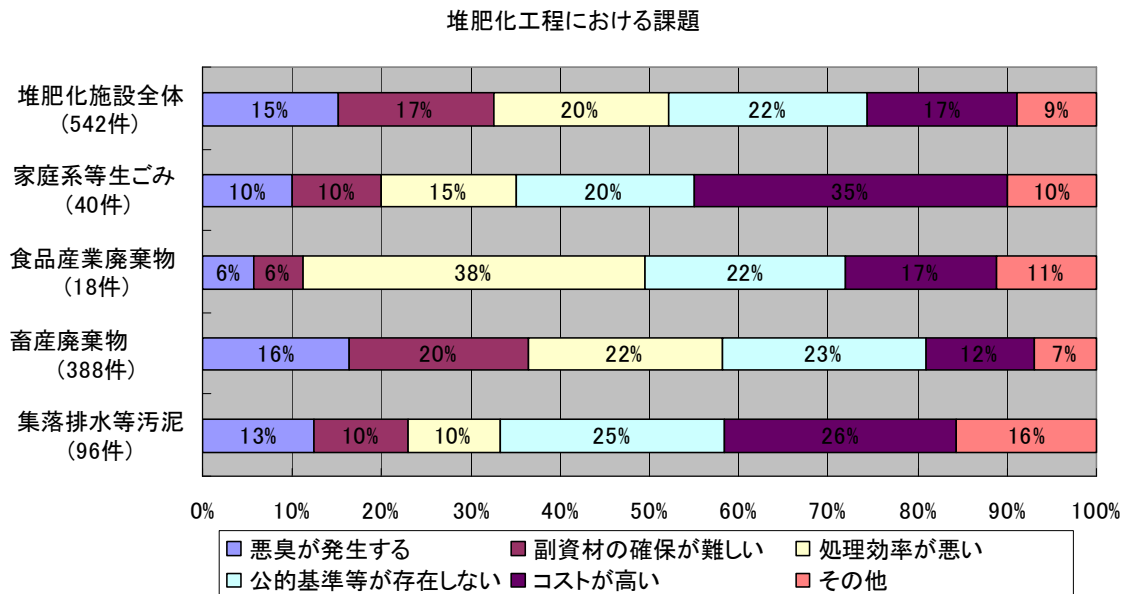


図 3-21 堆肥製造上の問題<sup>22)</sup>

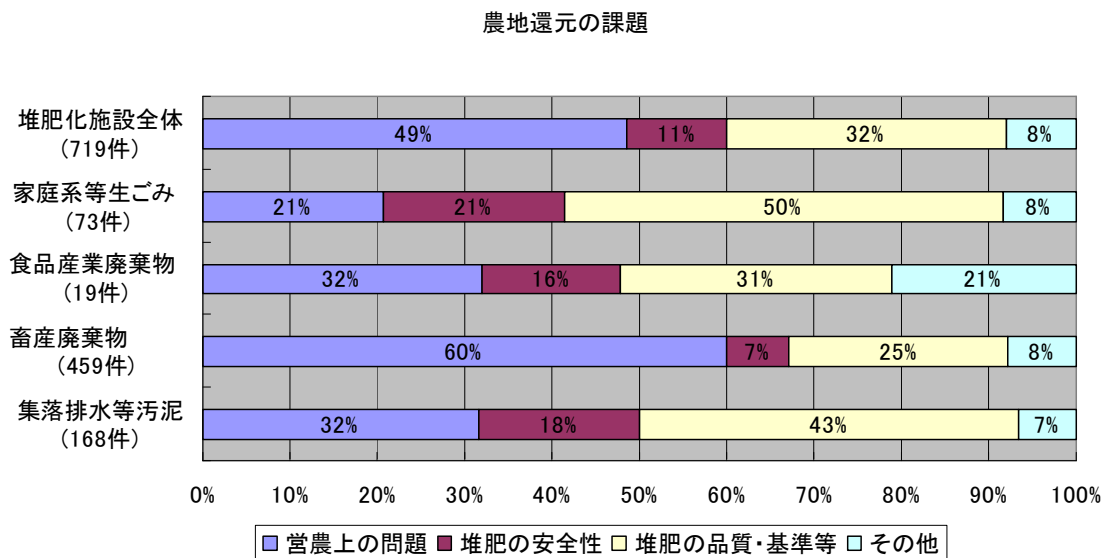


図 3-22 堆肥使用上の問題<sup>23)</sup>

コンポスト化が信頼できるプロセスとなるには、そのプロセスで起こったことの明確な表現、設計基準、品質の評価基準について更なる研究が必要である。



メタン発酵はその点では反応が液中であるため、分析や、定量が可能で、発酵槽内で何が起きているかが、分析値や負荷で表現できる。密閉系であるため反応の結果の物質収支もとり易い。しかし、それでもコンポスト化に較べると、酸素のないガスを扱う、発電機を扱う、ボイラを扱う、脱水機を扱うなど、農家の人が運転するには問題のある機械が多く、維持費や設備費が高価になる。

しかし現在ドイツでは、コンサルタントが合理的なプラントを提案し、農家は機材を自ら購入して納得できる設備を建設し、農業者自ら発電機のメンテナンスを行い、脱水機の調整を行って、メタン発酵設備を運転して、再生エネルギー製造者としての利益も得ている。この仕事の部分をプラント業者に任せたのではその利益はプラント事業者に配当される。農業者は自然エネルギーを操ることを農業そのものの一環として行えることが要求されているように見える。

化石エネルギーの枯渇が不安視されるなか、再び、再生可能な自然エネルギーを使用しなければならない事態が現実のものとなっている。しかし、そのあり方は 70 年前と同じでは、今の生活レベルは維持できないだろう。個人の能力が上昇して、風力やバイオマスを自由に操れる人には一定の生活レベル維持ができる、そのような世界なのかもしれない。

本章では、固形有機物に対する微生物システムの比較を、直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化についてシステム上の比較を行うとともに、実験を行って検討し、以下の結論を得た。

- 1) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化とのシステム比較において、同じ固形有機物原料を利用する場合には、施設に要求される性能や機能は大きく変わらない。メタン発酵でのバイオガス利用設備は別と考えることができるので、消化液処理の問題が無ければ、施設費用に大差ない。更に運転に際し、直接コンポスト化は通風のための消費動力が多い。
- 2) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化での分解ガスの発生の仕方は、直接コンポスト化では二酸化炭素以外に大量の未反応有機ガスが排出され、これが臭気となる。メタン発酵では、バイオガスに硫化水素が混入するが、硫化水素は処理されてからエネルギー利用されるため臭気の問題は生じない。そのコンポスト化では発生臭気ガス量は極めて少ない。
- 3) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化について、固形有機物の分解性という面から、同じ固形有機物（生ごみ：紙ごみ：粕殻＝100：10：8）について実験行って比較した。その結果、コンポスト化では 46% の有機物分解率であったが、メタン発酵では 72% の分解率があり、メタン発酵の分解能力の高さが際立った。メタン発酵では分解した有機物はバイオガスとしてエネルギー利用できるが、その分、製品コンポスト生産量は少なくな

る。同じ水分の製品とすると 19 : 9 でコンポスト化のほうがコンポスト生産量は多い計算となった。

- 4) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化において、その製品コンポストの性能、能力を実験により比較した。同じ固形有機物（生ごみ）について、直接コンポスト化では 4 6 日間の好気発酵で有機物分解を 70% して製品コンポスト（K コンポスト）を作り、メタン発酵・コンポスト化では有機物分解を 91% 行なってメタン発酵し、その残渣を脱水後 7 日間コンポスト化して製品コンポスト（M コンポスト）を得た。この 2 種類のコンポストについて、栽培試験を実施したところ、対象区 100 に対し、500ml 土壌にそれぞれ 5 g の K コンポスト、M コンポストを加えた場合、K コンポストでは発芽率 100、生体重 80 と発育は不良であったが、M コンポストでは発芽率 100、生体重 166 と良好な発育があった。
- 5) 現在我国での有機性廃棄物の再利用の方法は、やはり直接コンポスト化が圧倒的に多い。しかしその製品については、使用者側からすると品質上の不安が多い。一方、メタン発酵・コンポスト化は有機物原料からのエネルギー取り出しに優れるだけでなく、残渣のコンポストにおいても安心して利用できるプロセス的な保証が、雑菌についても、易分解性有機物の残量についても得られる。費用的な問題から直接コンポスト化が選択されることも多いが、環境的に必要な施設を装備するなら大差のないものとなる筈であり、メタン発酵・コンポスト化施設の普及はもっとあってもよいと考える。

### 第3章 参考文献

- 1) (財)クリーンジャパンセンター：平成10年度有機系廃棄物再資源化実証プラント実証実験報告書, p. 4 (2001)
- 2) 伊達昇：生ごみ汚泥等有機性廃棄物のコンポスト化技術－糞殻、木酢液を活用した生ごみコンポスト（長野県白田町）、企業研修協会, p. 54 (1999)
- 3) タクマ環境技術研究会編：ごみ焼却技術絵とき基本用語、オーム社, p. 125 参照 (2005)
- 4) 前述 3) p. 129 参照
- 5) 上木勝司、長い史郎：嫌気性微生物学、養賢堂, p. 12 (2004)
- 6) Luc De Baere: Development of anaerobic Digestion Technologies in Europe : Applications to Different Types of waste, Jornadas Internacionales sobre El Aprovechamiento Integral de la Materia Organica, p. 15 (1998)
- 7) 谷山昇、武本敏男、大木秀男、川崎照夫、生ごみの細組成、都市清掃, Vol. 50, No. 217, pp. 103-109 (1997)
- 8) 水試験方法、日本下水道協会 (1997)
- 9) 日本薬学会編：衛生試験法、注解2000、金原出版, pp. 151-238 (2000)
- 10) 堆肥等有機物分析法、日本土壌協会 (2000)
- 11) 肥料分析法、農林水産省農業環境技術研究所編 (1992)
- 12) 有機質肥料等品質保全研究会報告書-有機質肥料等推奨基準に関わる認証要項、全国農業協同組合中央会 (1994)
- 13) 藤田賢二、コンポスト化技術、技報堂, p. 72 (1993)
- 14) ㈱テルナイト ホームページ：フミン酸 その生成・特性・用途  
<http://www.telnite.co.jp/recruit/img/huminreview.pdf>
- 15) 社) 日本有機資源協会ホームページ、バイオマス利活用パンフレット、20年度版バイオマス・ニッポンパンフレット（一般向け）  
[http://www.jora.jp/txt/katsudo/k\\_biomass/h21\\_kbst/pdf/h20biomass\\_n.pdf](http://www.jora.jp/txt/katsudo/k_biomass/h21_kbst/pdf/h20biomass_n.pdf)
- 16) 清水徹朗：畜産環境問題の現状と課題、農林金融 1999/9, p. 48 (1999)
- 17) 高梨太志：食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律について、廃棄物学会誌, 11 (5), pp. 332-343 (2002)
- 18) 国土交通省：都市地域整備、下水道、資源エネルギー循環下水汚泥の形成、下水汚泥の利用状況  
<http://www.mlit.go.jp/crd/sewerage/sesaku/09shigen.html>
- 19) 中村真人、他：コンポスト化施設の抱える問題とコンポスト化に対する耕種農家の意識、農業工学研究  
<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/04/0409-18.pdf>

- 20) 日本有機資源協会 地域生物系廃棄物資源化システム調査専門委員会：  
地域バイオマス資源化システム解説書ーバイオマスタウン構築に向けてー  
「平成 13 年度農村地域における物質循環アンケート調査」（日本農業土木研究  
所），p. 44（2004）
- 21) 前述 20) p. 45 参照
- 22) 前述 20) p. 47 参照
- 23) 前述 20) p. 51 参照

## 第4章 固形有機物メタン発酵技術の比較と考察

### 4.1 はじめに

固形有機物メタン発酵そのものは、極めて古くから行なわれていると考えられるが、装置や施設として普及したのは水処理や汚泥処理としてのメタン発酵が先である。この経緯は第2章で見てきたとおりである。

固形有機物のメタン発酵といっても、メタン発酵そのものの原理的なことは水処理や汚泥処理メタン発酵と本質的には同じである。ただそこへの原材料の入り方が違ってくるため、様々な種類のメタン発酵法が生まれ、その用途が異なってきていると表現できる。即ち、扱う原料の違いがそのまま方式の違いという側面もあり、これらの手法について比較して論じるのは不適當な面があるかとも考えられるが、一方、共通に存在する問題については、方式によってはこれを無視したり、或いは違う対応したりと、比較すべき点があるのも事実である。

本章では、そのような固形有機物メタン発酵の様々な手法とその理由などについて考察を試みる。

### 4.2 メタン発酵技術の種類

#### 4.2.1 概要

メタン発酵の方法には、工学的には成熟したと考えられる下水汚泥のメタン発酵がある。そこでは原料は極めて均質で異物の問題は少なく、従って如何に低動力で効率良い攪拌が得られるか等が次の問題となる。一方同じような原料でもし尿処理の場合は、異物の問題は大きく、浮上スカムとタンク底部への沈着汚泥の問題が発生する。これらの除去のためには、定期的な手作業が必要となるが、メタン発酵槽はメタンと二酸化炭素が充満しており、更に硫化水素もあるため、発酵タンクへ人が入ることは容易ではない。この点が好気性の施設と大きく異なる点で、メタン発酵が省エネルギーとわかっていても採用されにくいひとつの理由である。

メタン発酵槽では滞留時間が10-30日となり、容量が大きい故に異物の沈殿や浮上の問題が起こりやすい。しかし、そのような点検の困難さ故、そこに複雑な機械式のスカム除去装置や沈降汚泥掻き出し装置は通常設けない。それより原料管理や攪拌の工夫でスカム破碎をおこなったりすることが考えられる。スカムの発生は、槽内部から発生するバイオガスの気泡に乗って、固形状、繊維状の有機物やプラスチックなどが浮上し、これを脂肪分が固めて形成される。一方沈降汚泥は土砂瓦礫の場合が多い。

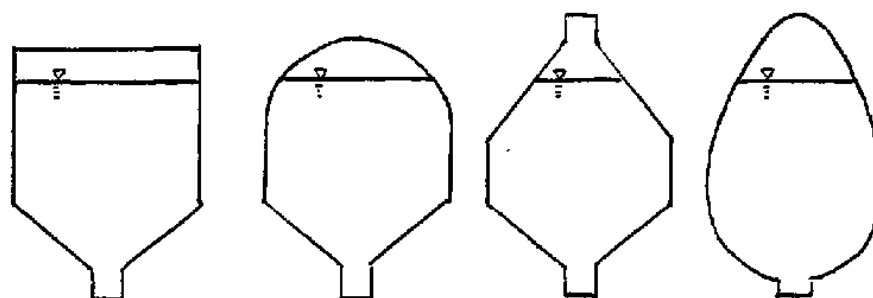
これらのトラブルを防ぐことができ、初めてプラントとして採用される。

ここで取り上げようとする原料は固形物であるため、まさにこの問題をどう解決しようとするのかが技術手法の違いとなって現れる。また、発酵物は加熱されて所定の温度に保たねばならない。ここも手法により異なるところである。

#### 4.2.2 湿式の固形有機物メタン発酵

汚泥や廃液でのメタン発酵は従来から行なわれており、それがこの技術の基本となる。汚泥や廃液のメタン発酵は歴史も長く、様々な手法が試され、効率的な攪拌や無駄の無い槽の形状となってきた。

例えば形状は攪拌のため投入されたエネルギーが水面で無駄に費やされないよう、上部水面積は小さくなり、形状も卵形などが求められるようになってきた。図 4-1<sup>1)</sup> に例を示す。



一般の発酵

水面積を小さくするように工夫した発酵槽

図 4-1 水面積を小さくしたメタン発酵槽の断面<sup>1)</sup>

固形有機物の植物原料ではセルロースやリグニンといった、その生物の形を決めている成分があり、その間に分解しやすいデンプンやタンパク質がある。デンプンやタンパク質がメタン発酵される時も、また前処理の異物分離過程からも、これらのリグニンやセルロースの微細な形状のものが発酵槽内に残ると、これらは浮上して堅固なスカム層を形成する。

このため、前処理で十分な異物除去をするシステムでは、上図のような液処理用メタン発酵槽を使えるが、前処理での手間を省く、或いは原料に繊維分が多いとなると、発酵槽の形状もそれらを考慮したものとなる。

以下にこれらの観点からいくつかの例の検討を試みる。

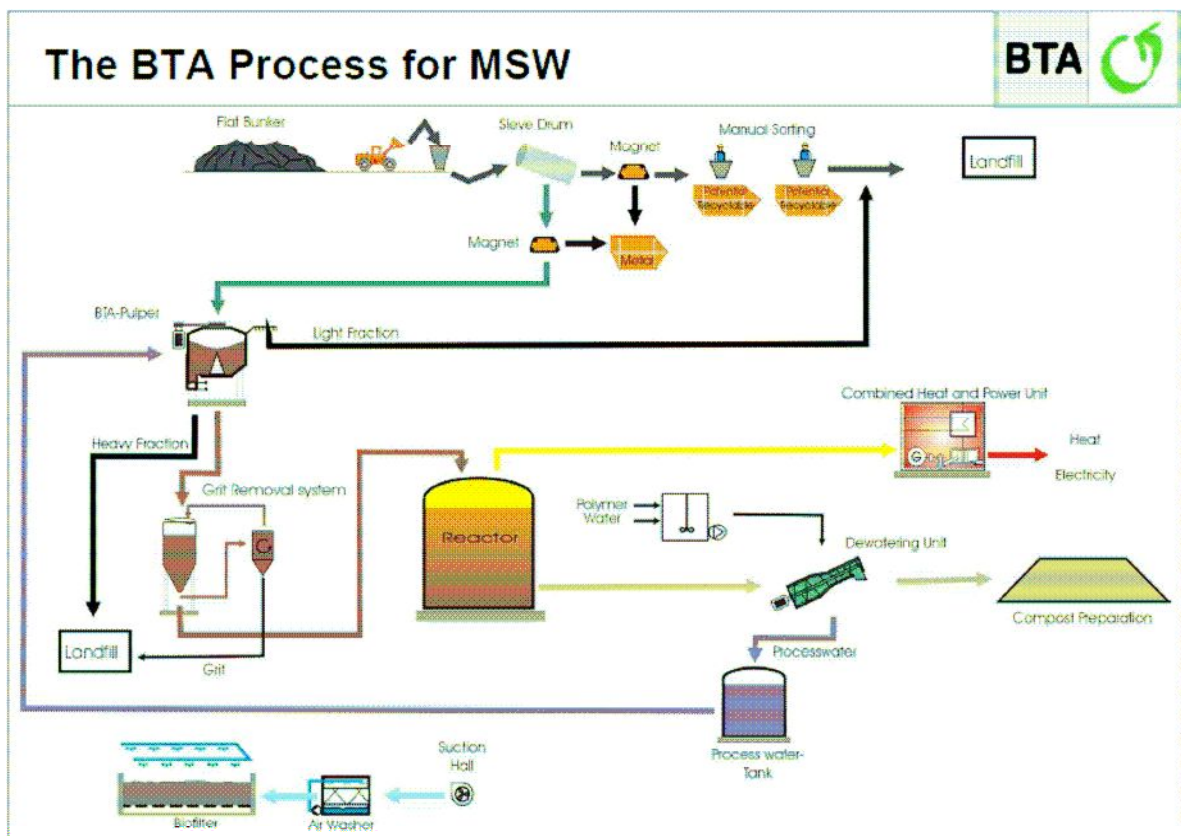


図 4-2 BTA 社フローシート ( 1 ) <sup>2)</sup>

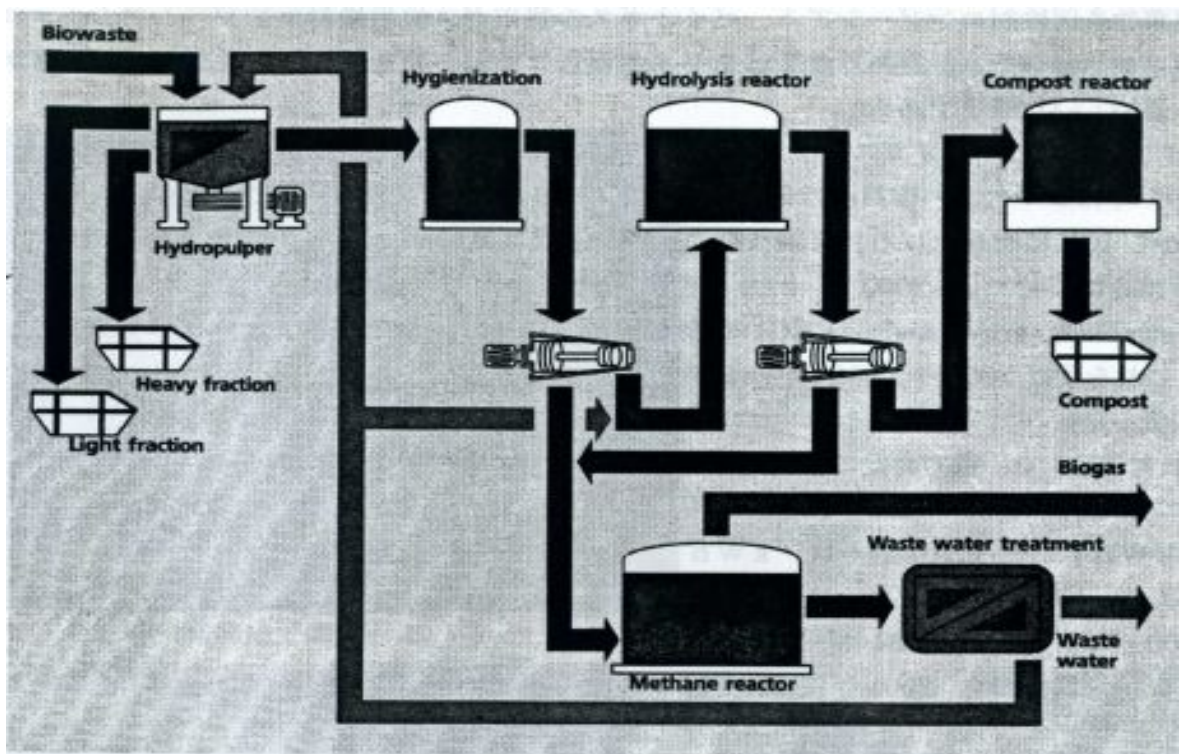


図 4-3 BTA 社フローシート ( 2 ) <sup>3)</sup>

BTA 社のプラントは図 4-2<sup>2)</sup> および図 4-3<sup>3)</sup> に示されるように、比較的丁寧な前処理を行って、異物の除去をするため、発酵槽そのものの形状やその攪拌装置に特別なものを要求しない。発酵対象物を水に完全に溶解してからメタン発酵する。その前処理での溶解の方法は物理的水中破碎と微生物可溶化の組み合わせである。第 2 章で紹介したように、バーデンバーデンでの BTA プラントでは、前処理施設のみ設備して発酵槽は既存の下水道汚泥消化槽を使っている。すなわち固形有機物メタン発酵では、メタン発酵とは別のプロセスで分解しておいてから、溶液部分をメタン発酵するという考え方を貫いている。イタリアのベローナ市のごみ処理メタン発酵も最後は BTA 社が引き受けて完成しており、確実なプラント構成で成功している。

溶液の作成手法は、物理的なハイドロパルパーによる水中破碎とそれに続く異物除去と微生物分解である。ハイドロパルパーは、水流により浮遊物を水槽内で回転し、これを槽壁に取り付けられた刃により切断し小さな破片として溶解させるもので、リサイクル紙を液に溶かし、付着した針や金具を除去するのによく用いられる。また続く微生物分解槽では特に空気の投入など行わないため、結果的には嫌氣的な酸発酵的な分解を行うとともに、ここで沈殿物の除去ができる。

しかし問題もある。有機物の加水分解は好気、嫌気いずれの状態でも起こるが、ここでの過剰な分解はバイオガス生産量を減らしてしまう。固形物からの有機物溶出だけで、その反応を終えたいところであるがそうはいかない。また最大の問題は物理的破碎ハイドロパルパーで必要とされる動力である。原料の何倍かの水量を攪拌しながら、内容物の切断と分離を行うもので、メタン発酵での NET での発電量が問題となる日本では慎重な計画が必要となる。

BTA 社のような考え方は他にも日本において各種取り入れられている。いずれもパルパー機構をつけて原料の破碎溶解を短時間で達成しようとするもので、フィンランド・サイテック社より導入された技術を基に開発されたメビウスシステム、或いはドイツ、リンデ社の技術などがある。メビウスシステムでは、固形物からの有機物の取り出しに物理的破碎分離とミックスセパレーターという異物除去兼可溶化を行う槽をメタン発酵槽の前に設置する。リンデ社では、パルパーの後にドラムシーブで異物を除去し、調整槽や衛生化装置で滞留時間をとることで可溶化を進めている。

以下の図 4-4<sup>4)</sup>、図 4-5<sup>5)</sup> にそれらのフローシートを示す。



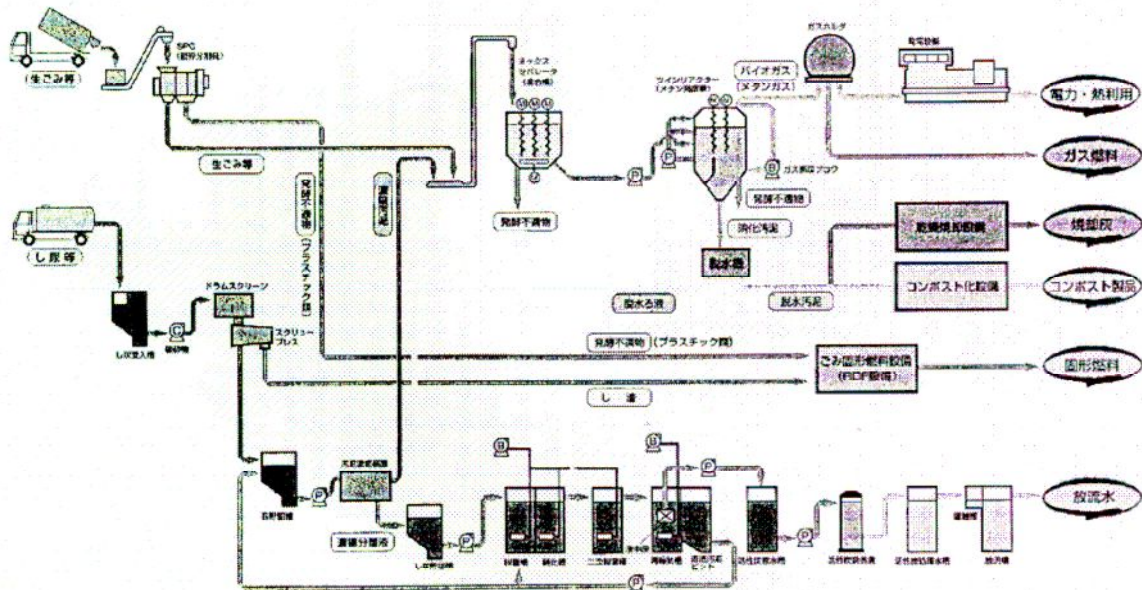


図 4-4 メビウスシステム フローシート 4)

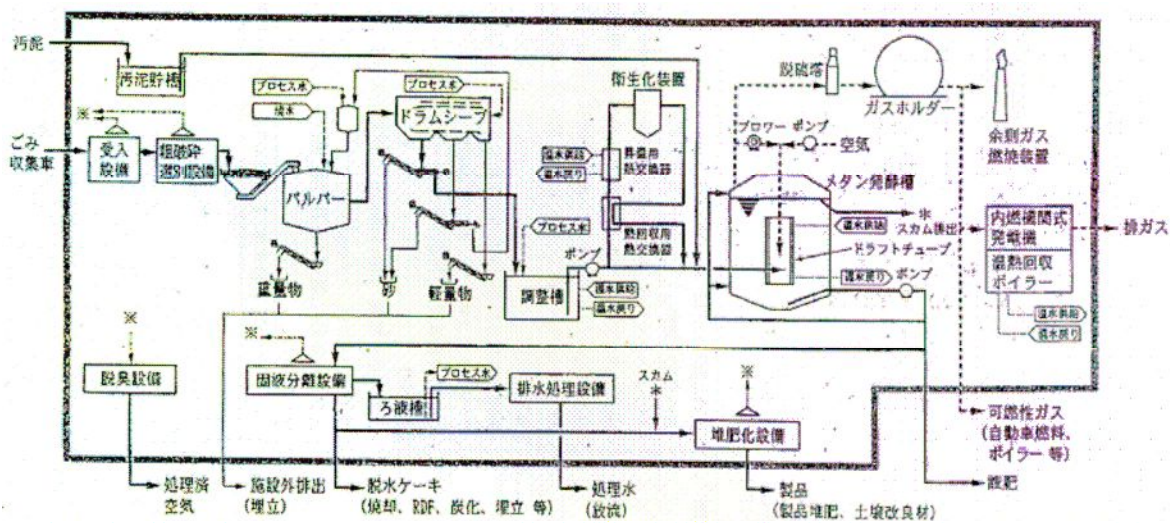


図 4-5 リンデ社システム フローシート 5)

これらの比較的重装備なメタン発酵システム以外に、もっと簡単に固形有機物からバイオガスを取り出そうとするシステムがある。酪農などの畜産農家が設置するメタン発酵システムで co-digestion (協同発酵、混合発酵) と呼ばれるシステムである。そこでは原料有機物の管理がある程度可能であることを前提に、システムを可能な限り簡素化して初期投資を抑制する努力がなされてい

る。デンマークやドイツではここでバイオマスエネルギーの取り出しを行うとともに、脱離液の窒素を利用してこれを液肥として牧草の養分として利用するシステムを構築してきた。バイオマスエネルギー利用促進の政策が2000年から顕著になるにつれ、政策支援も増え、このシステムの建設も盛んになってきた。

完全な前処理設備の建設には多くの資金を必要とするために、簡易な前処理でありながら、発酵槽の構造でそれを補うもので、大規模な下水道消化槽にはそぐわないが、個人農家の消化槽には使用できるものがある。それが以下の図4-6<sup>6)</sup>に示されるような消化槽である。

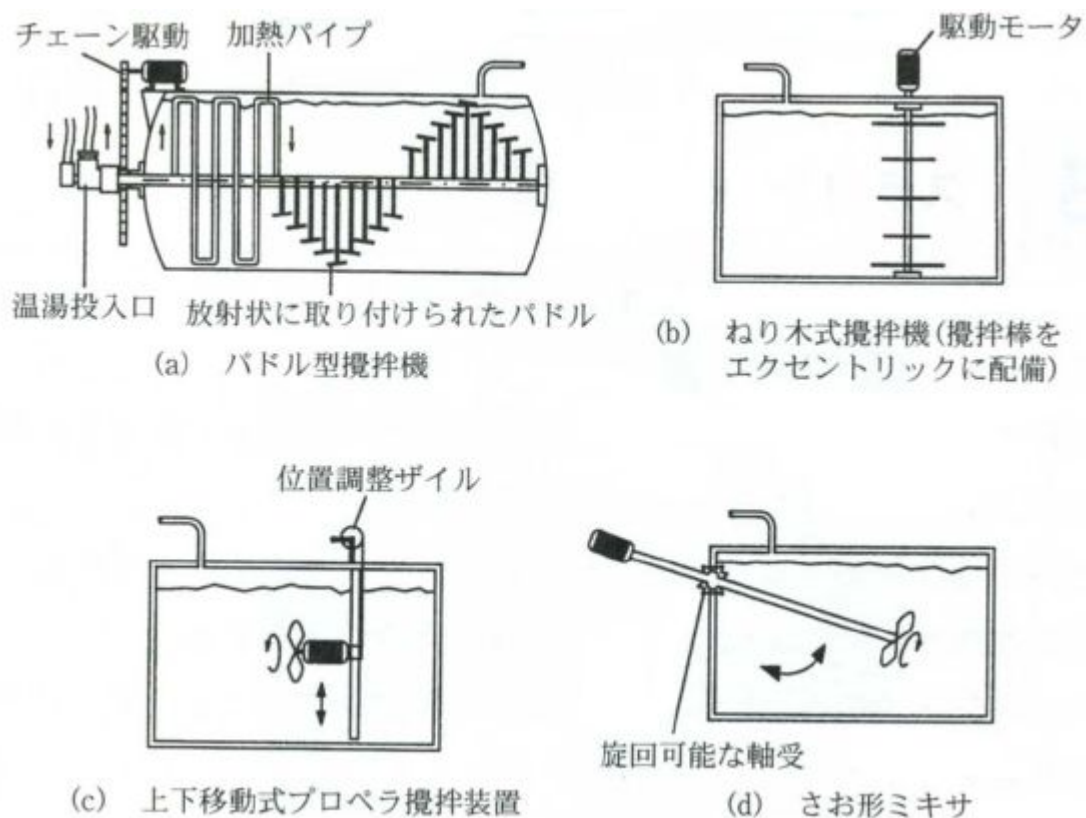


図 4-6 個人農家消化槽例<sup>6)</sup>

ここでは簡素ながら、内容物の攪拌とスカム対策を考慮した、メタン発酵槽の各種方式が見られる。固形有機物メタン発酵では、このように攪拌とスカム対策が重要な方針となる。

ここでの原料は家畜糞尿と農業残渣、食品加工残渣、廃食用油などで、紙やプラスチックの混入は原料選定の段階で入ってこない。それでも植物繊維は多く、スカム生成の原因物質となる。基質の槽全体にわたる攪拌を行うことで、局所的な酸発酵をふせぎ、スカムの生成も防いでいる。前処理は従って主に破

砕が中心となる。異物の入ってくる原料も扱うなら、その後ドラムスクリーンなどが必要となってきた、個人農家の副業の範囲を越えてくるが、何軒かの農家が集まった場合はそのようなプラントも可能になってくる。

この Co-digestion の考え方は、今まで見た湿式メタン発酵とは若干異なる。費用的な問題もあるが、固形有機物をそのまま破碎だけでメタン発酵槽へ投入している。即ち固形有機物からの有機物取り出しをメタン発酵にまかせている。このため、固形有機物の持つ微生物分解できる有機物エネルギー取り出しに損失は生じておらず、全てが利用できている。

原料のほとんどは家畜糞尿という場合が多く、運転の固形分濃度は湿式メタン発酵の 10% 程度の場合が多い。しかし、固形有機物の投入割合もプラントによっては異なり、次節の乾式メタン発酵と変わらない内容のプラントもある。

#### 4.2.3 乾式の固形有機物メタン発酵

乾式メタン発酵について、IEA の論文では、発酵槽内基質濃度を 20~40% DM (固形分) 程度に高く保ち、一定比率で植菌を行い、高温発酵 (50~55℃) で運転されることが多い、としている<sup>7)</sup>。

原料は破碎と異物分離だけでメタン発酵へ投入される。必要に応じて水分も加えられる。多少の異物は基質と混合されて発酵槽から排除されることを目指しており、異物分離はメタン発酵槽を出た後で行う。リグニン、セルロースは発酵槽内の菌により食べ分けられて残り、デンプン、タンパク質、脂質は酸を経てバイオガスへと転換される。従って湿式メタン発酵でみた有機性溶液を前処理で精製する手間とそれに伴うロスは最小限に止められることになる。

乾式メタン発酵は一般的には発酵槽内固形物濃度は高い。発酵槽内基質濃度が高いことは、相対的に効率のよい装置を構成することができ、発酵槽容量あたりの発生バイオガス量が高くなる。前処理では移送に支障ない程度の破碎でよい、分離に費やすエネルギー消費量を小さくできる。ただ原料の移送は、そのような固形物混合液を送れるものでなければならず、一般的にはピストンポンプが用いられる。ピストンポンプは高圧から低圧までであるが、高圧のものは消耗部品が多く、運転には注意を要する。

乾式メタン発酵では、だいたい 55℃ 近辺の高温メタン発酵が採用される。固形物濃度が高い分、有機物負荷も高くとりたいところで、その場合は高温メタン発酵が適する。高温にするためのエネルギー増加分は発生バイオガス増量により充分賄われるとともに、発酵槽内での流動性や移送を楽にする。

乾式メタン発酵では押出し流れタイプの反応が発酵槽では取られる場合が多い。これは高濃度であるため、完全混合するのはエネルギー消費が大きすぎる

装置の構成上、これらの考え方の相違が湿式メタン発酵と乾式メタン発酵を大きく変える。湿式メタン発酵ではスクリュूपレスによる異物の分離が発酵槽に入る前に行われるが、乾式メタン発酵では、発酵槽内での細菌群により資化されなかったものを、発酵槽を出てから、スクリュूपレスなどによって分離する。

代表的な押出し流れ乾式メタン発酵では、発酵槽が縦型のもので DRANCO、発酵槽が横型のもので KOMPOGAS がある。以下の図 4-7<sup>8)</sup>、図 4-8<sup>9)</sup>、図 4-9<sup>10)</sup> にその例を示して検討を試みる。

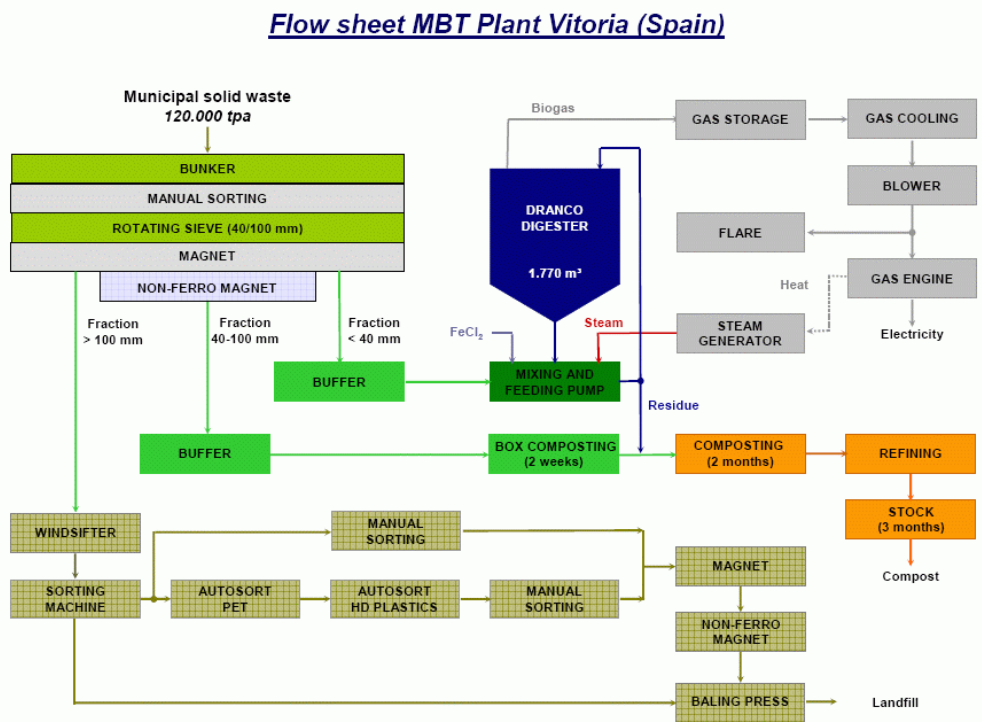


図 4-7 DRANCO システムのフローシート例 (1) <sup>8)</sup>



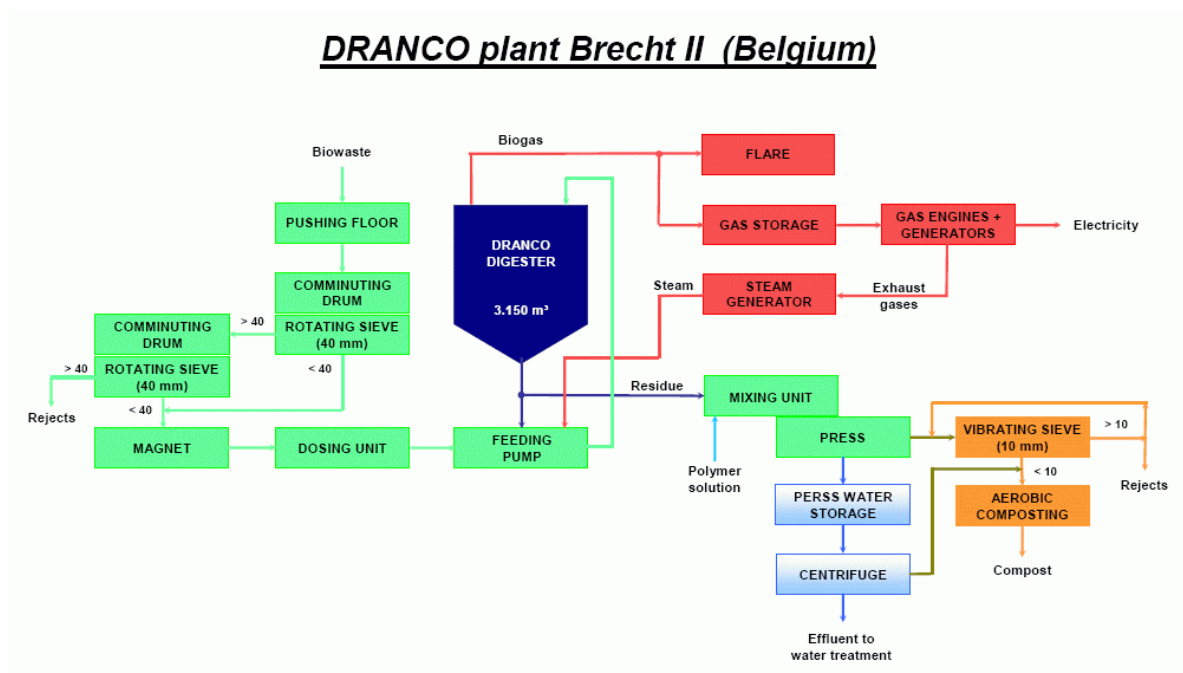


図 4-8 DRANCO システムのフローシート例 ( 2 ) <sup>9)</sup>

DRANCO システムの例-1 では都市ごみのメタン発酵を行っている。ここでは紙、厨芥、プラスチック、缶類、ビン類など雑多な原料が供給される。人手により大まかな選り分けを行った後、100mm と 40mm の篩にかけて、40mm 以下をメタン発酵原料、40～100mm をメタン発酵残渣と混合してコンポスト原料、100mm 以上をプラスチックや木質の不活性物質として、そのまま埋立てるという方式をとっている。40mm 以下というのは装置側の必要条件であるとともに、そのような大きさになるもののほとんどは厨芥や紙で、メタン発酵の原料となるということで、このようなシステムを作ったのであろう。破碎操作が入っていないのも無用な動力を使用しないということになるが、一方このプロセスでの考えは、主要なごみ処理目的は埋立てにあり、その過程で、簡単にバイオガスやコンポスト化できるものだけ利用しようという考えであることが読み取れる。

DRANCO システムの例-2 では分別収集されたバイオウエイトを対象としており、供給された原料のほぼ全てをバイオガス化しようとしている。従ってここでは、装置側の必要条件としての 40mm 以下に原料を破碎することだけを主眼にした前処理設備が設けられている。このように、原料収集段階で分別が行われていれば、前処理用機械装置の数は減り、所要動力も少なくなる。

DRANCO の発酵槽は縦型であることと、その発酵槽内に何も機械装置を持たないのが特徴とされる。これは発酵槽の最大の問題である内部装置のメンテナンスを不要にし、かつ内容物が全体に下部から排出されるため、スカムや沈殿物

などの滞留がない。そのかわり、ポンプによる循環攪拌を行い、1日に全容量を何回か循環する。ポンプ動力は移送だけでなく攪拌動力も表わすことになる。しかし縦型で投入位置が高いため、ポンプ圧力が必要で動力消費量も多い。またポンプはピストンポンプを使っているが高圧のためメンテナンス費用も多くなる。装置上の問題としては、重力で内容物が下部の小口径の配管に排出されるためには、水分の少ない固めの原料移動にはかなりの安息角（勾配）が必要とされるが、それは槽形状として細高いものとなるため、十分な角度がとれないことが多い。一方水分の多い原料では一方的に中央部分だけが排出され滞留時間の均等化に困難が生じる。適切な安息角は一概には決められず、物によって異なるため、さまざまな廃棄物を受入れる場合、運転上で困難なことが生ずることも予想される。基本的には発酵槽は細く高くなければならず、そうでない槽では、内容物がみずから理想の形状を取って排出されていくため、槽の底部コーナーは有効に利用されないゾーンとなる。この場合容積が小さくなり、発酵に十分な時間が設計どおりにはとれなくなる。

次に図 4-9<sup>10)</sup> に示される横型発酵槽タイプの KOMPOGAS システムについて検討を試みる。

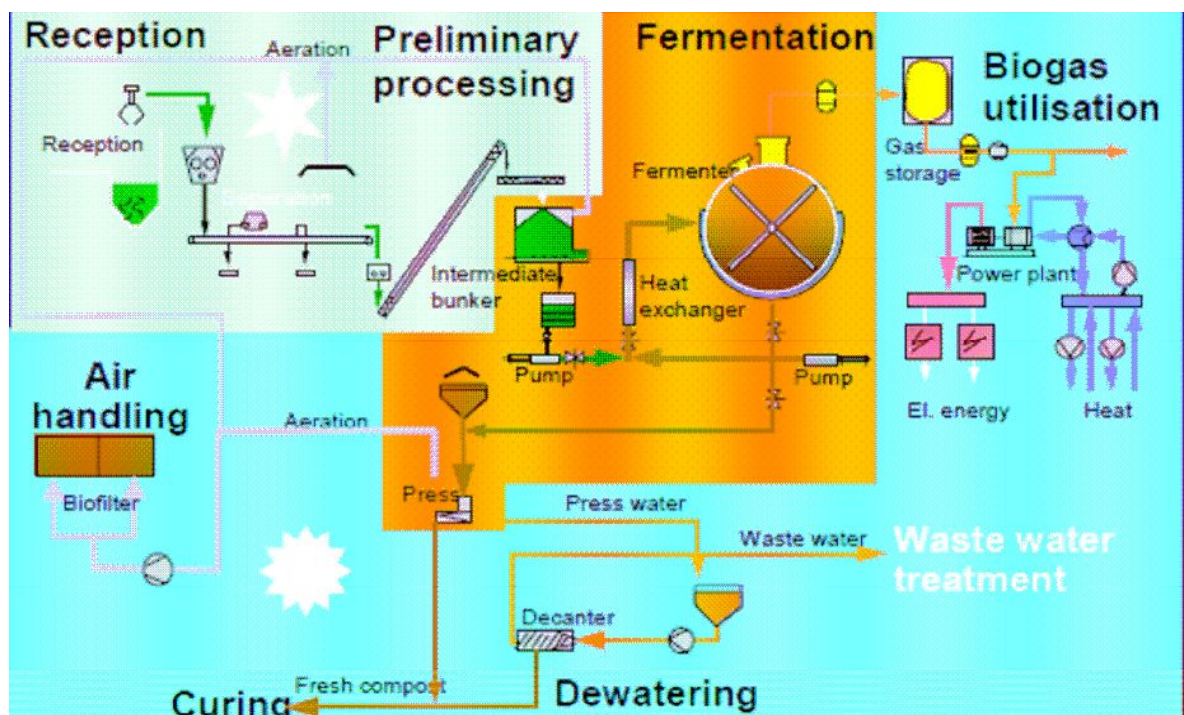


図 4-9 KOMPOGAS システムのフローシート例<sup>10)</sup>

ここでの発酵槽は円筒横型で内部に攪拌装置をもち、投入された原料は押し込まれ、引き出されることにより、発酵槽内を移動してゆく。投入原料側へ発

酵物のリターンもされるが、植菌の目的だけなので、多くても投入量の1日分の返送ですむ。移送にはピストンポンプを使うが横型であるため、投入位置は低く、従ってポンプのシールも簡単でメンテナンスフリーに近い。この装置での問題は発酵槽内での層分離である。原料に混入する異物の割合と原料の水分が問題となる。プラスチック等の異物が多いとそれはスカムとなるし、石や金属は沈殿物となる。しかし、この現象は水分濃度によって異なる。水分が多く粘度が低い発酵槽内では層分離は簡単に起こるが、有機物の固形物濃度が高く水分濃度が低くなって粘度が高くなると、スカムや沈殿物は層分離せず内容物として排出される。

乾式メタン発酵が発酵槽内濃度を高く保つのは、発酵効率が高くなること以外に、メタン発酵特有のスカムや沈殿の問題をこの方法で克服できるからであろうと考えられる。また一方で発酵槽内濃度が高いと完全な攪拌を阻害し、菌の均等な分散を妨げ、それは分解効率を落とす側面もあるとも考えられる。しかし、横型発酵槽内で入口から出口に向かう押し出し流れのなかで、嫌気分解がそのステップを構成している様子をみると、このプロファイルをこわすほどの攪拌は必要ないように見える。

このプロセスでの前処理は、原料がバイオウエイストであるため、破碎が主なこととなる。異物除去では金属磁選別も行うが、KOMPOGASでは人手による方法を尊重している。機械的な選別は発酵残渣のコンポスト製品の品質を落とすとして、人手による分別を薦めている。排出源分別が徹底されれば、装置側での負担が減りかつ上質の発酵残渣が得られるが、排出源分別の可否はその国での事情によって異なるであろう。

次に同じ高温発酵の乾式メタン発酵であるが、完全混合タイプのVALORGA方式を見てみる。

VALORGA方式では他の乾式メタン発酵に同じく、発酵槽の後にスクリュウプレス配して発酵残渣から水分を除去するが、発酵槽の攪拌にガス攪拌法を用いる。ガス攪拌は湿式メタン発酵などでは、ガスリフターなどを設置してそのガス使用量を節約しながら槽全体の攪拌を目指す。乾式メタン発酵ではガスリフターなどは利用できないため、槽底部に微細孔ノズルを多数設置して、それぞれにガスクューブを繋ぎ、全面ガス攪拌としている。ガス圧力も必要とするため、ガスブロワではなくコンプレッサーを使用する。

この方式の場合はやはり、発酵槽内固形物濃度はやや低めとするほうが、ガス攪拌は行いやすくなる。ガスはバイオガスを利用するため耐食性のコンプレッサーを必要とし、建設費も運転費も高価になりがちである。

以下の図 4-10<sup>11)</sup> にその例を示す。







に良い。ここではそのような前処理で用いられる手法について検討を試みる。

#### 4.3.2 物理的破碎溶解

湿式メタン発酵では破碎と溶解は、基本的な固形有機物取り込みのための前処理装置である。

このうち破碎装置は、原料が有機物主体で必要破碎サイズが 20～40mm 程度なら、破碎方法としては、二軸破碎機が一般的で、コストも低い。ただこの破碎機は繊維性の長ものは苦手で、そのような原料については一軸破碎機やギロチン式となるが、これらは動力消費も多くコストも高い。

湿式メタン発酵では、繊維状のものを破碎するのに水流中で粉碎するハイドロパルパーが用いられることが多い。これは紙等のパルプ繊維をより微細にする装置で、原料を水の中に入れて、これを攪拌し、その水流中に刃をいれることで切断してゆく。滞留時間が微細さの程度と相関性があるので破碎程度を制御できる。この装置においてもプラスチック等は浮いたり、金属や瓦礫等は沈んだりするので、装置の外に取り出す工夫が必要となる。不完全な除去となり易いが、図 4-11<sup>12)</sup> の BTA 装置では、沈殿物や浮上性物質は次の分離槽でサイクロンを使いながら分離している。

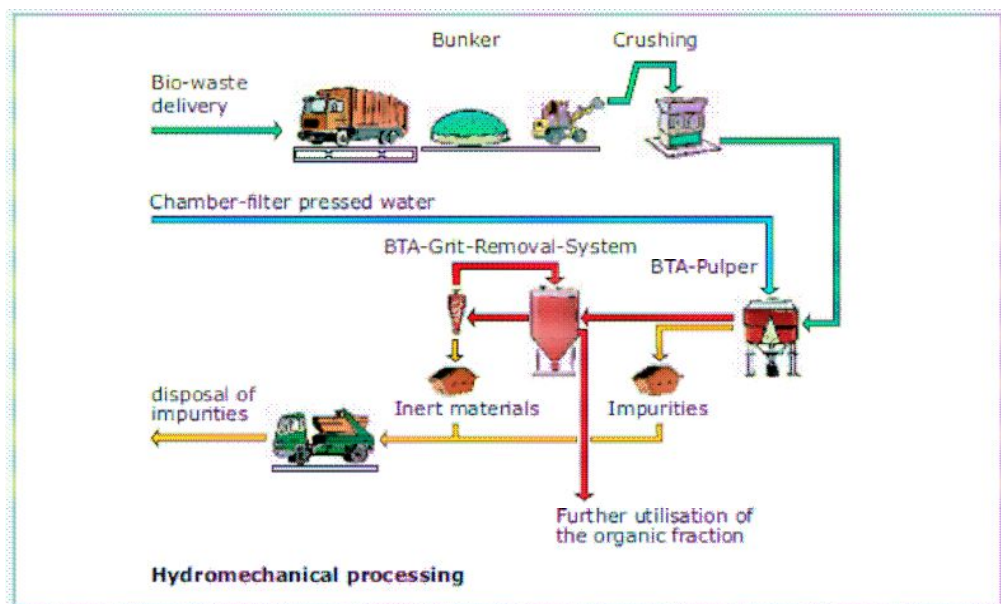


図 4-11 BTA 社 前処理フローシート例 <sup>12)</sup>

#### 4.3.3 微生物関与の可溶化

機械的な破碎、微細化はそれだけ動力の消費が大きい。そこで通性嫌気性菌による固形有機物の分解、可溶化を行って、メタン発酵しやすい形に原料の有

機物を変える手法がある。通性嫌気性菌による有機物の分解は、乳酸発酵やアルコール発酵がその典型であるが、一般的には酸腐敗がおこりながら固形有機物の可溶化が進む。高濃度有機物の存在下では少々の空気攪拌を行っても好気性の雰囲気は保てないが、有機物の分解は促進されるので、曝気する場合や単に攪拌するだけとか様々な方式がとられる。酸腐敗のため、pHは低めになる。ただ、有機物と反応しただけでは、発熱とともに二酸化炭素と水への転換がすすみ、有機物のエネルギーの消耗は起こることになる。

図 4-12<sup>13)</sup> 微生物関与の可溶化の例を示す。北見市に設置された IMC システムで、生ごみ等のメタン発酵を行ったもので、破砕後、滞留時間 1 日の攪拌曝気のある加水分解反応槽が設けられている。この槽はスクリュープレスの前に設置され、そこで可溶化性有機物と繊維質との分離が行なわれる。スクリュープレスからは繊維質が分離され、この残渣はコンポスト原料とされる。

確かに溶解したメタン発酵原料は取り出されるが、可溶化プロセスでのエネルギーロスや、酸腐敗であるため激しい臭気の発生問題は避けられない。

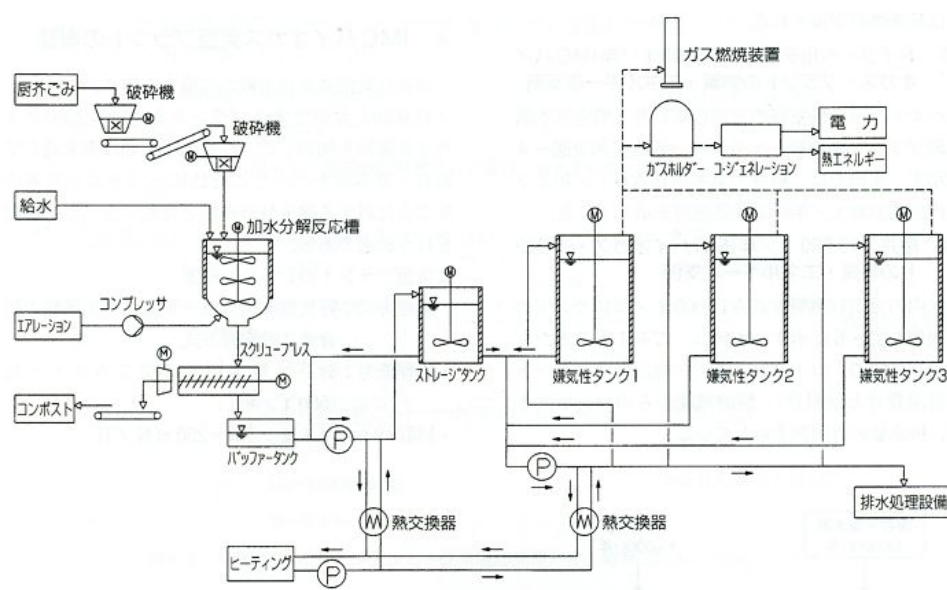


図 4-12 IMC システム フローシート例<sup>13)</sup>

#### 4.3.4 乾式メタン発酵の前処理

固形有機物乾式メタン発酵の前処理でも、破砕と可溶化はその主要な手法である。ただこの他に、その原料の性状によって他の様々な手法が必要とされる。それらは、金属類を選別する磁力選別機や、大きさによって性状が異なる場合に大きさを分類するトロンメル（ロータリードラム）篩いや振動篩い、比重差で選別する風力選別機、などといったものである。

固形有機物を原料とするプラントでは、純粋に固形有機物だけが集められることは少なく、金属やプラスチックといったメタン発酵できないものも入ってくる。また、紙や剪定枝といった分解しにくい木質や繊維分も入ってくる。前処理により、これらの中から目的とする物質を取り出しメタン発酵することが必要である。即ち、収集される原料とメタン発酵しようとする原料との間をうまく繋ぐことの出来る前処理手法がプラント構成においては求められ、その成否がプラントの成否を決めることも少なくない。

例えば我国の一般廃棄物は、厨芥や紙ごみ、プラスチックなどがその主体となる。これを原料とするメタン発酵においては、それが高温メタン発酵であるなら選別したいごみは厨芥、紙ごみである。また、メタン発酵できなかったものは焼却にすることになれば、これに適するごみは紙やプラスチックである。紙ごみはどちらのプロセスも利用できるが、水分付着した紙はメタン発酵、乾いた紙は焼却というような分け方が適切であろう。そのような破碎選別を行う装置として、図 4-13<sup>14)</sup> のようなものがある。

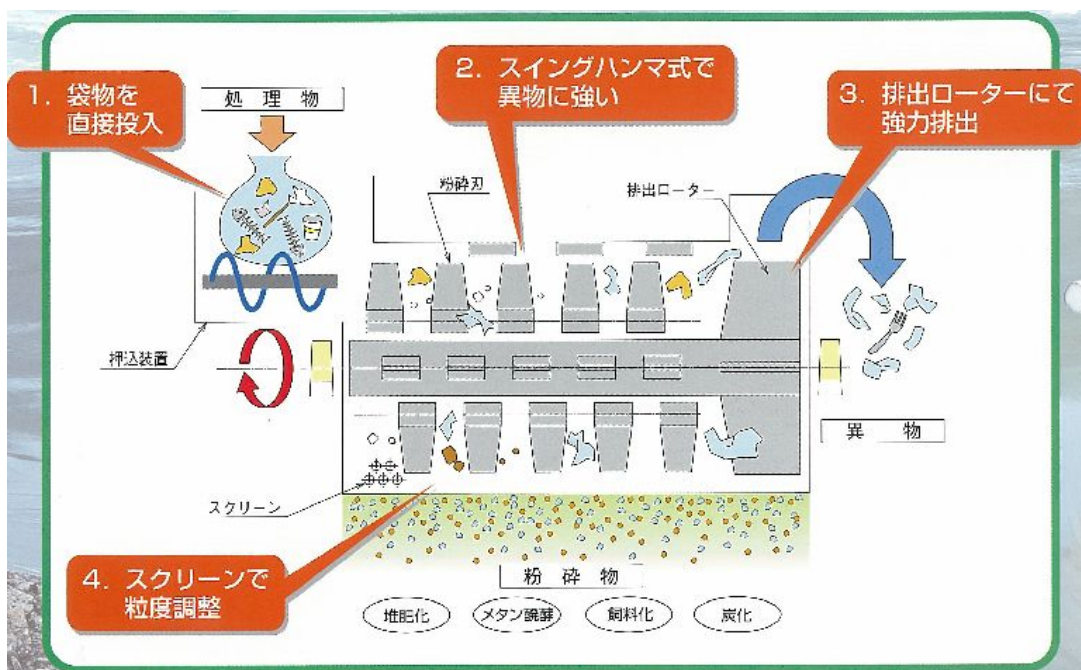


図 4-13 破碎選別装置例 <sup>14)</sup>

この装置では、トロンメルの中に回転破碎刃が入った形になっており、更に回転破碎軸にはインペラが取り付けられ、風力吸引排出がされるようになっている。1 台で破碎、篩い分け、風力による比重選別が行える。この装置を通すと、比重の大きい水分の多いごみはトロンメル入口に近い部分で排出され、風

で運ばれ易いプラスチックや乾いた紙などはトロンメル出口で排出される。また、回転破碎の刃はスイング式になっており、硬いものについては無理に破碎せず排除し、トロンメルの篩い分け穴の閉塞の解除もこの刃が行う。

紙ごみが水を吸うことを利用するなら、原料ごみに散水することで、メタン発酵へ行く紙ごみ比率を上げる操作も可能となる。

ただ、この装置でも小石や小金属の類が厨芥と同じところで排出されてしまう。金属はこの後磁力選別をつけることで排除できるが、小石については排除しにくい。小石の排除は液中での沈殿除去しかない。発酵槽の手前に沈殿槽を設けて除去するか、発酵槽のなかで処理を考えることになる。

#### 4.3.5 メタン発酵槽内での現象

メタン発酵槽内では発酵操作に伴い物理的な現象として何が起こるのか、或いは何ができ、何ができないのかを考えておくことも、前処理装置の構成を考えるうえで必要なことである。

メタン発酵槽での滞留時間は数十日になるため、何の機械操作も入らなければ、重いものは沈降し、軽いものは発生バイオガスとともに浮上しスカムを構成する。我国でも昔見られた野壺においても、一見すれば、上部に乗れるのではないかという堅固そうなスカム層が形成される。これらの沈殿物や浮遊物が、発酵槽の外に出ることができないと、蓄積して、微生物反応に必要な槽容積を小さくする。また、いつかは攪拌装置が止まったり、内部基質が出てこなくなったりして、装置を止めるにいたる。従って、これらの排除の仕組みがない場合は、前処理でそのような原因物質を除くことになる。

固形有機物はメタン発酵を容易に起こすデンプン質や糖質、たんぱく質、脂質の他に、そう簡単には分解しない繊維やものによっては木質リグニンなどから構成される。従って、メタン発酵しやすいものが分解した後の残渣は、繊維分と木質リグニン分が取り残されたものとなる。また当然、小石やプラスチック、金属等も分解されないで残る。これらのうち、繊維分や木質リグニン分、プラスチック類は浮上しやすく、小石や金属類は沈殿しようとする。

多くの場合、固形有機物の形状はこの繊維やリグニンにより形成されており、その間にデンプン質や糖質、たんぱく質、脂質など分解し易いものが存在する。破碎されることで、固形物表面積は増加し、分解され易いものが直に発酵槽内の菌と接触もでき、分解は始まる。

分解のスタートは加水分解で、分解されやすい部分は溶解し、酸分解を始める。温度の高い発酵槽のほうが物理的分解も起こしやすいし溶解も速い。酸分解したものは、そこにいるメタン菌により引き続きメタン発酵して、二酸化炭

素とメタンが生成される。うまく動いているメタン発酵槽では、原料が投入された付近でも、酸発酵で生ずる酸はそこに蓄積することなくメタン分解し、このとき生ずるアルカリにより pH は中性程度には保たれる。或るいはその付近で中性が保たれるようにメタン菌の多い基質が循環されている。この状態は酸発酵に停滞をもたらさない。

メタン発酵槽内でこのような分解が起こる場合、特に前処理で固形有機物の可溶化や酸発酵を行う必要は無い。しかし発酵槽内が液状で菌体濃度も低く完全混合の状態にある場合、大きな固形有機物は、投入され溶解する前に固形物の形状のまま出口に到達することもある。そのようなシステムでは、前処理で溶解だけは完了させておくことが必要となる。

前処理機械操作で、この繊維やリグニン分は残してデンプン質や糖質、たんぱく質、脂質だけを取り出そうとするのは、相当の動力を必要とする。せっかく微生物にその働きが出来るのであるから、大きな破碎は機械操作となっても、その後は微生物利用による分解が普通であろうし、より精密にデンプン質や糖質、たんぱく質、脂質を取り出せる。

発酵槽での攪拌操作は、発酵そのものの促進を目的として行われるが、同時に基質の浮上や沈殿を抑制する効果も期待する。どの程度の攪拌力を投入すれば望む状態になるかは、入ってくるものの種類と量、基質の濃度によって異なってくる。多くの動力を投入すれば浮上や沈殿を防止し発酵も促進されやすくなるであろうが、その動力量を例えば発生バイオガスから生成される電力量に比較してみれば、自ずと上限は決まってくる。特に、原料に固形物が多い場合などは、一般的な溶液攪拌のような回転数を取るには大変な動力が必要となってくるし、その分攪拌羽の強度も必要になってくる。固形有機物の入ったメタン発酵での発酵は穏やかな攪拌とならざるを得ない。

発酵槽内基質濃度が上がってくると攪拌が困難になるが、浮上や沈殿も緩慢になる。特にそれは有機物中の分解されない繊維分の濃度に大きく関係する。繊維分濃度が 10% を越すようになってくると、内部溶液は高い粘度を持ち始め、異物は沈降しにくく浮上もしにくくなる。それは哺乳類動物の腸内と同じようになるわけで、繊維分濃度が高くなると最後は浮上も沈殿も関係なくなりペースト状物質になって全てが絡まって排出される。横型押出し流れの発酵槽では、発酵の立ち上げに下水汚泥を使う場合、そこに投入されたプラスチックや紙の繊維分は始めスカムを構成するが、槽内基質濃度が高くなるにつれ、それらを全て排除できるようになってくる。

メタン発酵槽の運転濃度が数%程度の場合は、浮上するようなものを入れない前処理を行う場合が多いが、入ってしまったものについてはその排除装置を

設けるか、浮上しないような攪拌、または浮上物をたたいて沈めるなどの手法が必要になってくる。ただ、発酵槽の上部空間は密閉構造で可燃ガスが充満しているため、複雑な機械装置や電動機の設置はできない。従って、浮上物を排除する装置としては上部液を抜くことのできる大口径配管をしておくとか、浮上物をたたいて沈めるなら液循環ポンプを設置し上部散水するかといった方法となる。攪拌だけで浮上物をつくらない方法は見当たらないが、基質全量を循環するなら浮上を抑えられるかもしれない。

#### 4.4 固形有機物メタン発酵手法の評価

##### 4.4.1 概要

固形有機物のメタン発酵の方法は、ここまで見てきたように様々ある。それらをいくつかの観点から見て、その手法の得失を考えてみる。対象とする方式は、BTA システムやリンデシステムのような原料に水を加えて行う湿式メタン発酵方式（破碎選別後、ハイドロパルパー破碎を行い、加水分解可溶化後、異物除去してメタン発酵する）と KOMPOGAS システムや DRANCO システムのように原料をほぼそのまま使う乾式メタン発酵方式（破碎選別後、メタン発酵してその残渣をスクリープレス脱水して異物除去を行う）である。

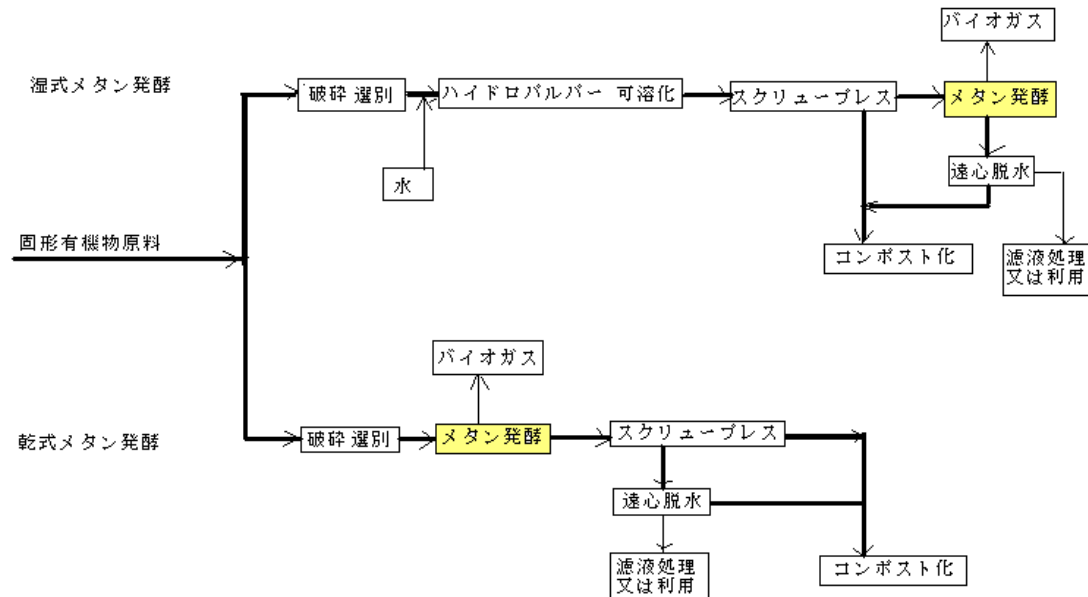


図 4-14 湿式と乾式のメタン発酵法比較

##### 4.4.2 エネルギー得失

消費エネルギーの違いを二つの方式で見てみる。

原料が同じ条件なら、破碎選別もスクリープレスも遠心脱水も同じ施設と



なってくる。メタン発酵槽も有機物負荷から容量を計算しているとすれば大きさは変わらない。湿式は薄い液で乾式は濃い液となり、攪拌速度は薄い液では高く、濃い液では低くとり、結局容量が同じなら大きな差は出ない。全体では、湿式メタン発酵の方で設置するハイドロパルパー、可溶化設備の動力分、湿式メタン発酵のために消費電力は大きい。

生産エネルギーの違いは、投入原料が同じなら、バイオガス生産量も変わらず、同じ熱量が基本的には生産される。

ただし、ハイドロパルパー、可溶化で、バイオガス化可能な有機物の一部が繊維分と一緒に排出されることを想定すると、上述と違ってくる。湿式メタン発酵では、バイオガス化する有機物量が減るので生産バイオガス量が減る。また、同時にコンポスト化へ送られる残渣に有機物が入ってくるので、コンポスト化施設でその反応に必要な空気を送る動力が必要となるし、臭気の問題も発生する。

#### 4.4.3 生産物の得失

メタン発酵での生産物はバイオガス、コンポスト、濾液である。

バイオガス量は前節のとおり投入有機物量から計算され同じである。一方、コンポストはかなり異なったものとなる。湿式で作られるコンポストの原料は、ハイドロパルパーで可溶化された分解性有機物と繊維分がメタン発酵の前に設置されたスクリープレスに送られ、ここから残渣ケーキが排出され、これが原料となる。微生物分解性有機分は多く残っており、コンポスト化すれば充分発熱する原料である。従って、ここで生産されるコンポストは好気コンポストほとんど同じものとなる。湿式でもメタン発酵後脱水がもう一度あるがここでのケーキ量は少ない。

一方、乾式では原料はとりあえずすべて発酵槽に投入され、メタン発酵が終わった後スクリープレスで脱水されたものである。このメタン発酵残渣には、微生物分解性有機分はあまり残っておらず、繊維やリグニンの多い原料なので、コンポスト化してもほとんど発熱しない。ただ揮発性アンモニア量は多い。そのアンモニア臭は発酵槽から取り出された瞬間はきついが、コンポスト化の開始後1日で直ぐに消える。栄養塩類の量は湿式コンポストのほうが、発熱濃縮がある分、濃いと考えられる。乾式メタン発酵から出来上がるコンポストは、従って臭気は少なく分解性有機物はほとんどないが、植物に必要な栄養塩類は繊維上に残っている。

メタン発酵処理液は湿式と乾式で異なる。湿式の方が量は多くなる。有機物濃度は、乾式が高くなる。これは濃度の濃い運転ということもあるが、メタン

発酵から出てきた後にスクリュूपレスをするため、原料中の残された有機成分が搾り出されることになって、どうしても高い BOD 廃水となる。その後、水処理放流する場合、高い BOD 廃液濃度は問題となる。しかし、固形有機物メタン発酵では窒素分が高くなりやすい。アンモニア態窒素濃度が 3,000ppm とするのなら、これを処理するために必要な BOD 濃度は 10,000ppm 程度となる。乾式から出てくる濾液の BOD は、およそ 10,000ppm で調度バランスがとれる。実際の運転でも乾式メタン発酵の場合、その BOD 濃度は 10,000ppm 前後にあり、むしろ調度良い。湿式ではもっと低い濃度の濾液となるのであろうが、窒素濃度がそこそこある場合、場合によっては他から BOD 源を持ってこないと処理できなくなる。

全体的に考察すると、湿式メタン発酵ではコンポスト化で本格的な生産物が得られるが、そのための代償として、臭気の問題が再燃し、メタン発酵のメリットの一つを失う危険がある。また、その分バイオガス発生量を減らしてしまっている。濾液では廃液濃度は湿式の方で低いが、脱窒素処理を行う必要がある場合はそれがむしろ BOD 源の購入という事態を引き起こすので注意が必要である。

#### 4.4.4 環境性

固形有機物を扱うときの最も大きな問題は、臭気である。特に原料を取り扱うゾーンの臭気処理が最も問題となる。原料受入れ、貯留、破碎選別にいたるあたりが最も問題となる。このことは、湿式であろうと乾式であろうと同じである。

湿式で設置する、ハイドロパルパーによる、可溶化及びここを通過した有機物を扱うスクリュूपレスも臭気発生源となる。有機物の可溶化分解過程、即ち好気コンポスト化工程では、初期にエステルやケトン、アンモニアなど刺激臭のあるものが大量に発生するため、密閉して負圧に維持することが必要である。負圧に維持するために引いたガスは脱臭装置へ持ち込むことになる。

コンポスト化の段階でも問題となるが、メタン発酵した残渣は取り出された初期にアンモニアが揮散するものの、分解する有機物はほとんどなくなっているため、臭気の問題は少ない。

#### 4.4.5 システム全体

湿式と乾式との大きな違いは湿式には前処理でハイドロパルパーによる、可溶化の設備がつくことである。この消費エネルギーが余剰電力発生にどのような影響を及ぼすか考えてみる。また他の方式との差も見てみる。



バイオガス発生量は原料によって決まってくる。メタン分解する有機物 1 t (乾燥重量) あたり  $800\text{m}^3$  のバイオガスが発生する<sup>15)</sup> と考えると次のようになる。

汚水、汚泥をメタン発酵したときは、原料固形物濃度が 4% 程度あり、そのうちメタン分解する有機物濃度が 2% とすると、発生するバイオガス量は上記条件で原料 t-wet あたり、 $16\text{m}^3$  となる。家畜糞尿処理に農産物を入れる混合メタン発酵の場合、投入有機物が千差万別で一概には言えないが、デンマークなどで推薦されるバイオガス発生量から、原料 t-wet あたり  $40\text{m}^3$  としてみる<sup>16)</sup>。湿式メタン発酵と乾式メタン発酵の場合、前処理での有機物ロスが異なるが、ここでは原料種類が違う場合のみを 3 種類考えてみる。一つは家庭厨芥ごみ主体<sup>17)</sup> で t-wet あたり  $100\text{m}^3$ 、一つは厨芥分別を呼びかけて収集したごみ<sup>18)</sup> で t-wet あたり  $120\text{m}^3$ 、もう一つは家庭厨芥ごみを破碎選別機に掛けて厨芥ごみと紙ごみが入ったもので原料 t-wet あたり  $165\text{m}^3$  程度のバイオガスが発生する場合<sup>19)</sup> で、これは湿式メタン発酵では紙は原料とならないので、無しとして考える。

バイオガスからの発電量を考える。バイオガスの低位発熱量はメタン濃度、水分などで異なるが、 $21,000\text{kJ}/\text{m}^3$  とし<sup>20)</sup>、ガスエンジン発電効率を 30%<sup>21)</sup> とすると、その発電量は  $1.75\text{kWh}/\text{m}^3$  となり、この値を上記バイオガス発生量に乗ずることにより、原料 t-wet あたりの発電量を得る。

次に消費電力を考える。(ある程度の規模、例えば 30 t-wet/d 以上がある場合とする)

汚水汚泥では前処理は既に終わっていて負荷は少なく 0 とする。メタン発酵そのものの消費電力として、槽攪拌と汚泥の脱水、ガス利用設備などで  $20\text{kWh}/\text{t}$  程度を消費すると想定する。

家畜糞尿混合発酵では、投入農産物の破碎と移送に電力が必要でこれを  $10\text{kWh}/\text{t}$  とし、発酵そのものは汚水汚泥と同じ  $20\text{kWh}/\text{t}$  程度とする。

湿式と乾式のメタン発酵であるが、これは原料を厨芥関係と想定するなら、異物除去もついた前処理が必要となる。湿式メタン発酵では、先ず受入れと破碎や選別で  $30\text{kWh}/\text{t}$  程度消費するとし、次にハイドロパルパー破碎・加水分解過程において  $30\text{kWh}/\text{t}$  消費し、前処理で合計  $60\text{kWh}/\text{t}$  程度消費すると想定する。次に発酵槽の攪拌と汚泥の脱水、ガス利用設備などでは家畜糞尿処理より多くかけるとし  $30\text{kWh}/\text{t}$  程度を消費すると想定する。発酵槽の濃度は希薄であるが、沈殿を防ぐことから回転数は大きい攪拌を利用する。

乾式メタン発酵では、湿式と同じく受入れと破碎や選別で  $30\text{kWh}/\text{t}$  程度消費するとし、発酵槽攪拌と汚泥の脱水、ガス利用設備などは湿式と同じ  $30\text{kWh}/\text{t}$

程度を消費するとする。発酵槽内の基質濃度は高いが、攪拌速度は極めてゆやかであるため、結局、湿式と変わらないと考える。

メタン発酵した残液について、欧州では当然液肥として農地にかえされるが、わが国では液処理が前提となる。このとき、汚水汚泥処理では、もともと水処理があるとして特に残液に処理は考えないとする。家畜糞尿の混合メタン発酵では、アンモニア態窒素濃度が原料で 3,000ppm として、その硝化の空気吹き込み、嫌気攪拌動力で等 20kWh/t 程度を考える。厨芥を扱う湿式や乾式メタン発酵ではそれ以上のアンモニア成分が発生する。原料が同じなら発生するアンモニアも同じで、希釈して 3,000ppm にするとして、これを処理する動力は原料 t に換算して 2 倍の 40kWh/t 程度が必要と考える。

以上を表に収めると表 4-1 のようになる。

表 4-1 各種メタン発酵の消費・余剰電力の比較

|                                      | 汚水・汚泥<br>メタン発酵 | 家畜糞尿＋農産物<br>メタン発酵 | 固形有機物<br>湿式メタン発酵 | 固形有機物<br>乾式メタン発酵  |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|
| バイオガス発生量<br>(m <sup>3</sup> / t 湿重量) | 16             | 40                | 100<br>120       | 100<br>120<br>165 |
| 同上発電量<br>(k Wh/t)                    | 28             | 70                | 175<br>210       | 175<br>210<br>289 |
| 前処理消費電力<br>(k Wh/t)                  | 0              | 10                | 60               | 30                |
| メタン発酵消費電力 (k Wh/t)                   | 20             | 20                | 30               | 30                |
| 水処理消費電力<br>(k Wh/t)                  | 0              | 20                | 40               | 40                |
| 消費電力合計<br>(k Wh/t)                   | 20             | 50                | 130              | 100               |
| 余剰電力合計<br>(k Wh/t)                   | 8              | 20                | 45<br>80         | 75<br>110<br>189  |

バイオガス発生量の少ない原料を扱う時、湿式と乾式のメタン発酵の余剰電力比率は大きくなっていく。バイオガス発生量の多い原料でも水を多く加えれば湿式でメタン発酵できるはずではある。しかし、バイオガス発生量の多い原料とは通常の野菜等ではなく、油脂分や紙ごみ類が入ってこないと困難で、そのような原料に対して、対応できるプラントかどうかが問題となる。

#### 4.5 まとめ

本節で検討した項目に限れば、システム全体の合理性は乾式メタン発酵にあると考えられる。

しかし、湿式メタン発酵において、わざわざ前処理で異物の少ない有機物溶液製造を、エネルギーやコストを掛けて行うのは、それだけの前処理をしないと、メタン発酵槽でトラブルが生じると考えるからである。

メタン発酵槽で従来起こったトラブルの多くは、確かに浮上スカムや沈殿砂利による閉塞で、原因は混入してくる異物である。その延長で考えれば、固形有機物がそのまま発酵槽に入ってくるとするのは問題で、異物除去と更に固形有機物そのものの液化を行うのは自然な結論である。事実、希薄な溶液中に固形有機物が入るときはスカム生成の原因になる。また、固形有機物がそのまま希薄な完全混合発酵槽に投入されると、攪拌により固形物は循環し、分解する以前に出口から出る可能性もある。槽内に邪魔板など設置してでも短絡は避けたいところである。

乾式メタン発酵ではそのような問題に対し、槽内反応を高濃度基質での押出し流れとして短絡流を防ぎ、高濃度基質としてスカムや沈殿物の停滞閉塞を防いでいる。ただし、発生してくるバイオガスを抜く通路を作らないと、基質全体が浮上してしまう。このための穏やかな攪拌は必要である。

乾式メタン発酵においても、原料にタンパク質が多く混入してくる場合は、アンモニア態窒素濃度が 3,000ppm 以下となるよう、水を加えなければならない。このため原料によっては、基質濃度が下がり、スカム排除が充分出来ない場合が生ずる。繊維分の少ない原料の場合は紙ごみなどを添加することで、アンモニア態窒素濃度を高めないで槽内の固形物濃度や粘性を保てるので、そのような原料構成を考慮しておくことが必要となる。

このように条件を揃えることで、乾式メタン発酵を使うことができるようになり、そうなれば、湿式メタン発酵よりもこれは合理性を発揮できる。

本章では、固形有機物メタン発酵技術について、湿式メタン発酵と乾式メタン発酵を比較検討し以下の結論を得た。

- 1) 湿式メタン発酵ではメタン発酵に入る前に、原料有機物のメタン発酵する

部分を液中に溶出させて、これからバイオガスを取り出そうとするもので、発酵槽での機械的トラブルを防ごうとするものであるが、その過程で原料有機物のメタン発酵する部分も一部取り出して排除することになる。これは、バイオガス発生量の低下をもたらすとともに、排除したものの腐敗を招き悪臭の発生から逃れられない。またそのために要する電力も大きく、発電量の減少と消費電力の上昇の両方から経済性を悪くする。

- 2) 乾式メタン発酵では原料有機物の破碎と異物除去は行なうものの、そのまま、或いは水で希釈する場合もあるがそのまま、発酵槽に投入する。ある程度破碎された固形有機物を加水分解しメタン発酵するプロセスを全て発酵槽のなかで行う。このことで、原料から得られるバイオガスの全てを取り出すことができる。消費電力量も小さくなる。
- 3) 湿式メタン発酵と乾式メタン発酵の消費・余剰電力を比較した。原料バイオガス発生量が  $100\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合、余剰電力は、前者では  $45\text{ kWh/t-wet}$ 、後者では  $75\text{ kWh/t-wet}$  となり、原料が  $120\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合、余剰電力は、前者では  $80\text{ kWh/t-wet}$ 、後者では  $110\text{ kWh/t-wet}$  となる。更に原料が紙ごみを含む場合、そのバイオガス発生量は  $165\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合も考えることができ、余剰電力は乾式メタン発酵で  $189\text{ kWh/t-wet}$  となる。このとき一般的に湿式メタン発酵では紙ごみは排除すべき異物となり、そのバイオガス発生量の恩恵に預かれない。

#### 第 4 章 参考文献

- 1) 本多淳裕ほか：廃棄物のメタン発酵—理論と実用化技術—、サイエンティスト社, p. 48 (1981)
- 2) Presentation of the BTA technology  
[http://www.uest.gr/Morocomp/Presentation\\_BTA.pdf](http://www.uest.gr/Morocomp/Presentation_BTA.pdf)
- 3) 益田光信：JOHANNESBURG バイオガスプラント PETRUSHEIM バイオガスプラント、日本有機資源協会平成 15 年度海外視察団エントゾルガ国際見本市と欧州バイオガスプラント視察報告書、p. 59 (2004)
- 4) 廃棄物研究財団メタン発酵研究会：メタン発酵情報資料集 2006, p. 49 (2006)
- 5) 前述 4) p. 63
- 6) Heinz Schulz and Barbara Eder、浮田良則監訳：バイオガス実用技術、オーム社, p. 78 (2002)
- 7) IEA Bioenergy Agreement TaskXI : Biogas from Municipal Solid Waste - Overview of Systems and Markets for Anaerobic Digestion of MSW-, p. 16 (1994)
- 8) OWS 社 (DRANCO) ホームページ  
Vitoria (Spain), [http://www.ows.be/pages/ref\\_detail.php?prod\\_id=62&trans\\_id=63&submenu=125&choose\\_lang=EN](http://www.ows.be/pages/ref_detail.php?prod_id=62&trans_id=63&submenu=125&choose_lang=EN)
- 9) OWS 社 (DRANCO) ホームページ  
Brecht2 (Belgium), [http://www.ows.be/pages/ref\\_detail.php?prod\\_id=62&trans\\_id=29&submenu=125&choose\\_lang=EN](http://www.ows.be/pages/ref_detail.php?prod_id=62&trans_id=29&submenu=125&choose_lang=EN)
- 10) KOMPOGAS 社ホームページ  
<http://www.kompogas.ch/index.php?id=13&L=1>  
<http://www.bioenergy-lamnet.org/publications/source/bra/PPT-TA-5-Real-LAMNET-WS-Brasilia.pdf>
- 11) VALORGA 社ホームページ  
<http://www.valorgainternational.fr/fr/>  
[http://www.lacity.org/council/cdl2/pdf/Landfilling\\_Resources\\_Valorga\\_Anaerobic\\_Digestion\\_Facility.pdf](http://www.lacity.org/council/cdl2/pdf/Landfilling_Resources_Valorga_Anaerobic_Digestion_Facility.pdf)
- 12) BTA 社ホームページ  
[http://bta-international.de/mischsystem\\_fuer\\_die.html?&lang=3](http://bta-international.de/mischsystem_fuer_die.html?&lang=3)  
[http://www.swea.co.uk/downloads/Biogas\\_ROBYN.pdf](http://www.swea.co.uk/downloads/Biogas_ROBYN.pdf)
- 13) 堂野千里、浜嶋光洋：生ごみのバイオガス化技術（IMC バイオガス回収システム）について、環境技術、Vol. 29, No. 9, p. 20 (2000)
- 14) 破碎選別装置 カタログ

- 15) 社) 全国都市清掃会議：コンボガス式メタン発酵技術検証・確認報告書, p. 65 (2001)
- 16) Danish Energy Agency : Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants, p. 10 (1995)
- 17) 前述 13) p. 19
- 18) 三石勝也他、一般家庭系の生ごみメタン発酵施設紹介、生活と環境、平成 17 年 4 月号, p. 32 (2005)
- 19) 株式会社 タクマ：平成 17 年度次世代廃棄物処理技術基盤整備事業補助金技術開発報告書、乾式メタン発酵法による高効率原燃料回収技術の開発, p. 100 (2006)
- 20) 河村公平他、カンポリサイクルプラザにおけるバイオリサイクル施設の運転報告、タクマ技報、Vol. 13, No1, p. 36 (2005)
- 21) 前述 20) p. 36

## 第5章 固形有機物メタン発酵実プラント運転結果と検討

### 5.1 はじめに

固形有機物メタン発酵の実プラントでの利用は、我国ではまだ緒に就いたばかりである。今までのところ、それらの適用は民間の食品廃棄物を対象とした食品リサイクル法対象施設が多い。一方、今多くの自治体で検討されているのが、一般廃棄物のごみ処理施設において、水分の多い有機ごみはメタン発酵してバイオガスでエネルギー回収し、プラスチックや紙等水分の少ない高カロリーごみは燃焼して蒸気でエネルギーを回収する方式である。これは容器包装リサイクル法などにより高カロリーごみが資源ごみとして別途回収されるに伴い、ごみ発熱量が低下し始めた傾向に対処することと、有機ごみに資源としての意味を与え、ごみ全体への資源回収意識の向上を高めるためと考えられる。

そのような中で固形有機物を高温（55℃）でメタン発酵する KOMPOGAS 方式のものが、京都市と京都府南丹市に建設された。

京都市のものは 3t/日の実証プラントとして 1999 年建設されたものである。ここでは一般廃棄物を対象にして、ホテル厨芥、青果市場ごみ、新聞古紙、草木類などの高温メタン発酵が実験された。また、このプラントは将来のごみ処理でのメタン発酵プラントを実現するために必要な、有機ごみの機械選別およびそのメタン発酵という実験にも供されている。

南丹市のものは 50t/日で商用プラントとして 2003 年に建設された。ここでは有機性の事業系廃棄物や産業廃棄物ならびに地域家庭ごみの厨芥が分別された一般廃棄物が原料として供されている。このため原料有機物の種類は変化に富む。産業廃棄物としては、菓子、チョコレート、パン、あめ、バター、乳酸飲料、ポテトチップス、かまぼこ等、各種食品の主に賞味期限切れのものなどが包装材とともに持ち込まれる。従って、負荷変動が大きい施設で、安定運転はかなり困難なプラントである。

ここでは、そのような 2 プラントにおける高温メタン発酵と関連した実験について、その特性や能力に検討を加え運転方法を考えるとともに、メタン発酵を利用したごみ処理の形について検討を試みる。

### 5.2 実証プラントによるメタン発酵原料別分解性

#### 5.2.1 プラントの設備概要

本実証プラントは原料固形有機ごみ 3 t-wet/日、バイオガス発生量 300m<sup>3</sup>/日の能力の施設として計画されたもので、そのフローシートを図 5-1<sup>1)</sup>、主要機器仕様を表 5-1<sup>2)</sup>に示す。

本プロセスは、円筒横型発酵槽に対しプラグフローで運転される、スイスで開

発された KOMPOGAS 式乾式高温メタン発酵プラントである。

受入れ・前処理設備、貯留・供給設備、発酵槽、脱水設備、ガス利用設備から構成され、各設備の概要は以下のとおりである。

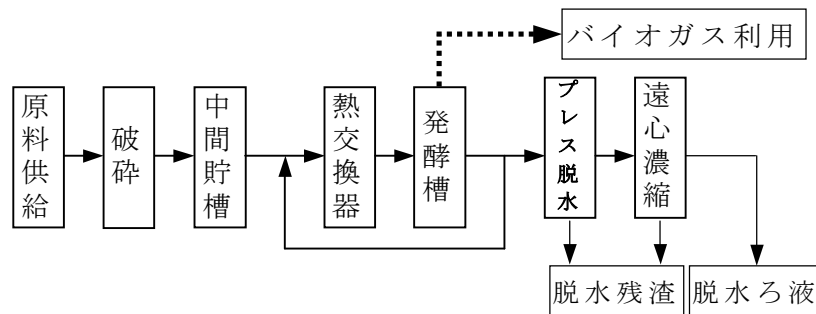


図 5-1 フローシート <sup>1)</sup>

#### (1) 受入れ・前処理設備

原料である有機系廃棄物を受入れ、その量を測定した後、二軸破碎機で 30mm 程度に破碎する。その後不適物除去を行って、中間貯槽へ投入する。

#### (2) 貯留・供給設備

中間貯槽は貯留機能とその後連続的に原料を供給する機能を持つ。2～3 日の貯留容量があり、底部にはムービングフロア(可動式パドル形供給機)が装備されている。

ムービングフロアによって 1 バッチ毎に原料をミキサーへと送り、プロセス水を加えて物質を均一なものとすると共に、含水率の調整を行う。調整された原料をピストンポンプで送り出し、熱交換器を介して 55℃ まで加温した後、発酵槽へと供給する。

#### (3) 発酵槽

発酵は 55℃ の温度を採用した高濃度高温嫌気発酵であり、発酵槽は円筒横型タンクで、原料を片側から投入し、反対側から排出を行う連続式の押し出し流れ方式となっている。押し出し流れ方式は、完全混合型と比較して、攪拌に必要な動力が少ないため省エネルギーシステムである。発酵槽での滞留時間は 20～30 日で、内部にはパドル型の攪拌機が装備されており、緩やかにガス抜き攪拌が行なわれる。

発酵槽から排出される発酵後の残渣の一部は入口へと返送することにより、入口部から速やかにメタン発酵を起こすための種付け調整を行っている。55℃



の運転温度で発酵を促進させるのは、短時間で高い発酵効率を得ることができるためであり、発酵槽内での流動性を確保することができる。

#### (4)脱水設備

発酵残渣はスクリープレスで固形物とろ液に分離し、さらにそのろ液から固形物を回収するために遠心濃縮機を装備している。

#### (5)ガス利用設備

発酵槽で発生したバイオガスは一旦ガス貯留槽に貯留し、それを利用して発電できるシステムとなっている。本プラントから発生するバイオガスにより、プロセスで使用する熱の全量と場内で使用する電力の一部を賄っている。

表 5-1 主要機器仕様<sup>2)</sup>

| 機器名称        | 数量  | 仕様   |
|-------------|-----|--|
| 破砕機         | 1 基 | 形式 二軸低速回転式破砕機<br>処理量 3m <sup>3</sup> /h (1.5ton/h) |
| 中間貯槽        | 1 基 | 形式 ステンレス製角型槽<br>容量 約 29m <sup>3</sup>              |
| ムービングフロア    | 1 式 | 形式 3 連油圧駆動式<br>(中間貯槽底面設置)                          |
| ミキサー        | 1 基 | 形式 2 軸スクリー式<br>容量 約 3m <sup>3</sup> (ハウジング容積)      |
| 供給、排出戻しポンプ  | 2 基 | 形式 ピストンポンプ<br>容量 約 260L/ストローク                      |
| 基質加温用熱交換器   | 1 基 | 形式 二重管型<br>内部温度 温水約 65℃ (管外) 基質約 55℃ (管内)          |
| 発酵槽         | 1 基 | 形式 円筒横置形<br>容量 100m <sup>3</sup> (直径 3m×長さ 18m)    |
| 脱水機         | 1 基 | 形式 スクリープレス<br>容量 0.45m <sup>3</sup> /h             |
| 遠心濃縮機       | 1 基 | 形式 遠心濃縮機<br>容量 0.45m <sup>3</sup> /h               |
| ガス貯留槽       | 1 基 | 形式 合成樹脂製フレキシブルハック<br>容量 50m <sup>3</sup>           |
| ガスエンジン及び発電機 | 1 式 | 形式 ガスエンジン発電機<br>容量 50kW                            |

### 5.2.2 事業系一般廃棄物による運転

本プロセスはスイスにおいて実用化されたメタン発酵法で、そこでの標準的な原料は、「バイオウエイスト」である。これは厨芥と剪定枝が混合した原料で、バイオガスを  $100\text{m}^3/\text{原料 t-wet}$  程度生産するプロセスというのが基本的な考えであった。廃棄物の性状というのはその国の生活そのものを現すため、同じような場所から排出されても、特に有機物の質は異なる。従って技術導入にあってはその国の廃棄物で運転するのが原則となる。

日本に導入するにあたって、例えば剪定枝などというごみは一般的にはないし、台所ごみをそれだけ集めるのは難しい。そこでホテルのレストラン等の事業系一般廃棄物を収集専門の業者から得、剪定枝は庭園業者から入手する計画とし、とりあえずはスイスでの運転を日本で再現することを目標とし運転を行い、次に各種の原料でその運転特性を研究して行くことにした。運転当初の2年間の運転は以下の図 5-2<sup>3)</sup>、5-3<sup>4)</sup>となった。

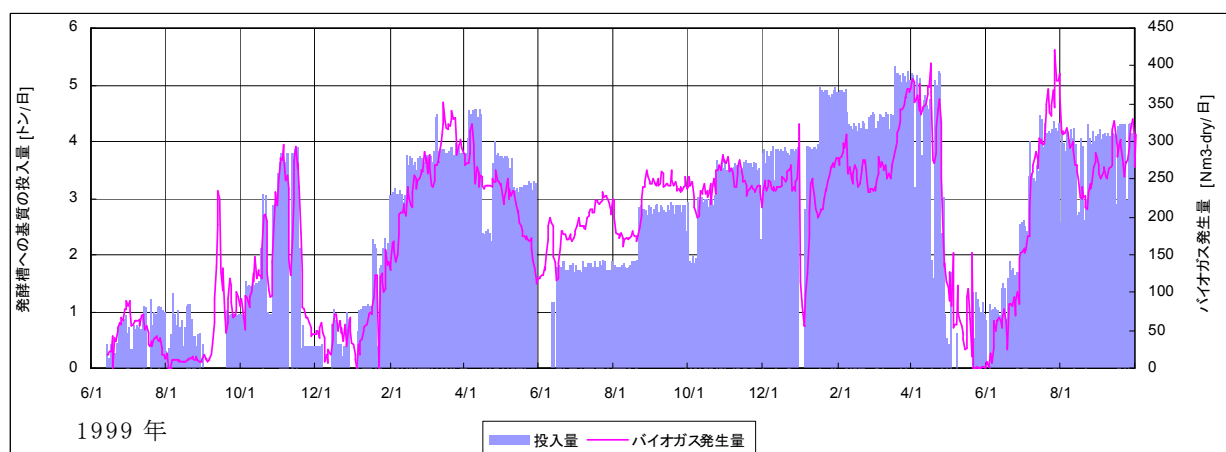


図 5-2 実証プラント原料投入量とバイオガス発生量<sup>3)</sup>

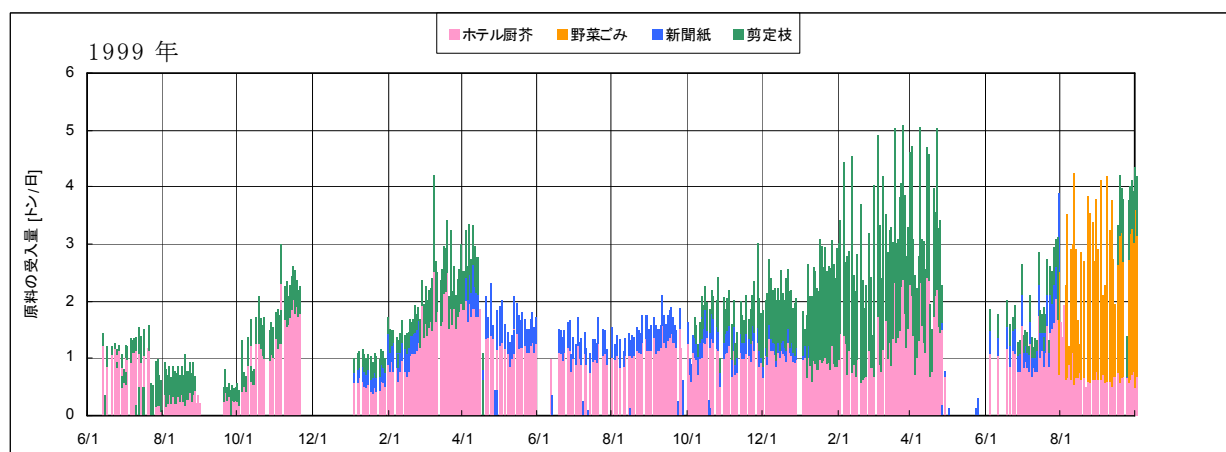


図 5-3 実証プラント投入原料の内訳<sup>4)</sup>

本プラントの最初の 3 ヶ月間は貴重な初期トラブルを経験した。

当初剪定枝の入手困難もあり、当面はホテル厨芥だけでの高温メタン発酵から開始することになった。立ち上げのための種菌としては、高温メタン発酵の下水汚泥消化設備からもらってこれを発酵槽に 25% 程度張って、そこにホテル厨芥を投入することで始めた。

ホテル厨芥投入後 2 週間程度は、有機酸濃度の上昇はあるものの、投入ごみ t-wet あたり 100m<sup>3</sup> 近いバイオガスの発生があり、簡単に欧州での固形有機物メタン発酵の再現ができそうな様子だった (図 5-2<sup>3)</sup>, 4<sup>5)</sup>, 5<sup>6)</sup> 参照)。しかし、有機酸濃度の上昇が収まらないなか、急激なバイオガス発生量低下がおこった。技術提携先にこの事態の対処を問い合わせると、「不調な発酵槽内の原料を引き出し、タンパク質の少ない原料で発酵槽内濃度を上げてプラグフロースタイルの運転を確立にすることだ」という回答であったため、引き抜き量を増やし剪定枝を大量に加えてアンモニア濃度を上げずに発酵槽内固形物濃度の上昇に努めた。しかし酸濃度もアンモニア濃度の改善も起こらず、遂には有機酸濃度が 2 万 ppm をこえ、アンモニア濃度も 4,000ppm になると更なるバイオガス発生量低下をきたし、設備運転停止を検討しなければならなくなった (図 5-5<sup>6)</sup>, 6<sup>7)</sup> 参照)。

ホテル厨芥は結局家庭とは大きく異なり、タンパク質豊富なごみで、加水分解後のアンモニア濃度は 5,000ppm を越えるごみで、これがメタン発酵の阻害を引き起こしていることが分かった。そこで固形物濃度は薄くなるが、まずは発酵槽内のメタン発酵状態の改善を先行させることにした。幸い未だ発酵槽内の基質量は半分に満たなかったのも、そこに倍量の湯を加えアンモニア濃度を 3,000ppm 以下とし、原料も加えず回復を待つと、急激なバイオガスの発生が起こり、酢酸濃度の低下があり、更にはプロピオン酸濃度の低下がおこり、活発なメタン発酵が始まった (図 5-2、1999 年 10 月近辺)。

以後の運転では、原料有機物も植物性主体としタンパク質濃度を下げることにするか、或いは水で希釈してでも分解アンモニア濃度は 3,000ppm 以下とすることとした。しかし、その状態が続くと、発酵槽内基質の全固形分濃度が 5% をきるような数値になり、そうなると発酵槽内で沈殿物と浮上物とが現れて、プラグフローを形成しなくなる。濃度が高いと全体が移動するが、濃度が薄いと層分離を起こすことが分かってきた。人体における腸内での移動に似ており、あまりに高い濃度では動けないし、あまり低い濃度では過剰流動と停滞の交互的な動きとなってしまう。適度に高濃度かつ粘度の高い流体が、押し出し流れ反応を形成するとともに、沈殿も浮上もなく全体が動き、発酵槽では都合がよい。

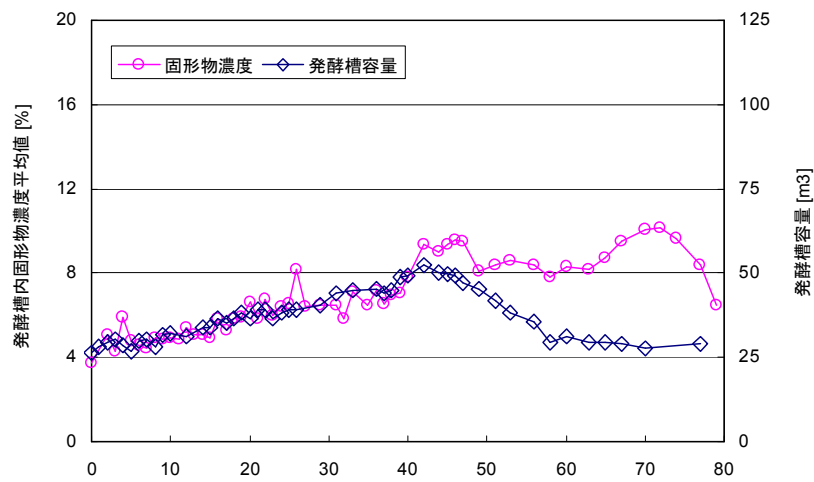


図 5-4 運転初期の固形物濃度と発酵槽内基質量<sup>5)</sup>

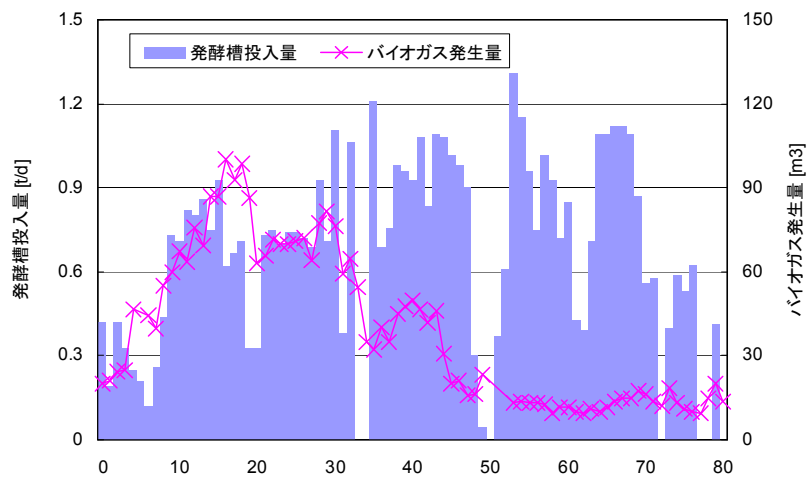


図 5-5 運転初期の原料投入量と発生バイオガス量<sup>6)</sup>

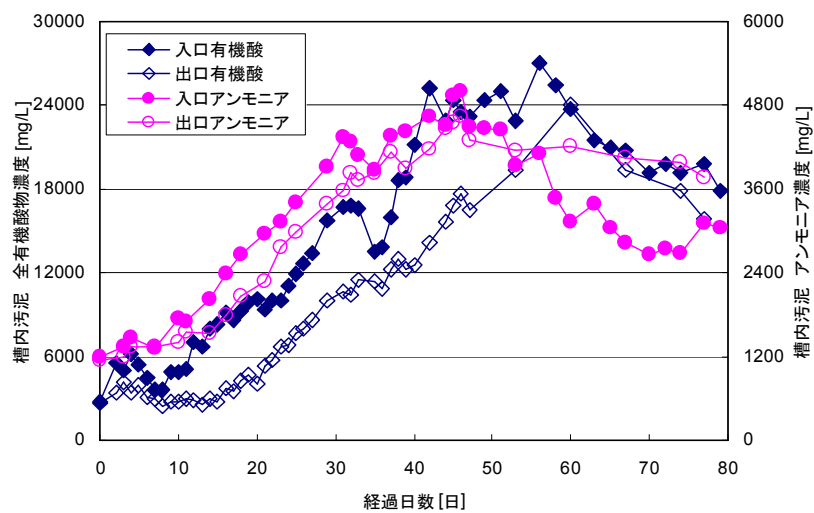


図 5-6 運転初期のアンモニア濃度と有機酸濃度<sup>7)</sup>

このような経緯のなかで、やはり原料として剪定枝を入れると槽内の固形物濃度維持とアンモニア濃度低下に役立つと考えられ、剪定枝も使って性能試験は行うこととなった。原料投入量 3 t-wet/日、バイオガス発生量 300m<sup>3</sup>/日を目指して、運転開始後 9 ヶ月程度を経て、表 5-2<sup>8)</sup>のような原料に対し、図 5-7<sup>9)</sup>のような性能試験を行うことができた。

表 5 - 2 廃棄物性状<sup>8)</sup>

|     |     | DS   | VS   | TOC   |
|-----|-----|------|------|-------|
| 単位  |     | %    | %-DS | %-wet |
| 厨芥  | min | 11.2 | 81.6 | 4.5   |
|     | Max | 20.4 | 95.8 | 9.7   |
|     | ave | 15.0 | 91.7 | 6.7   |
| 剪定枝 | min | 30.7 | 81.3 | 26.0  |
|     | Max | 76.7 | 97.2 | 49.5  |
|     | ave | 54.9 | 92.0 | 35.6  |

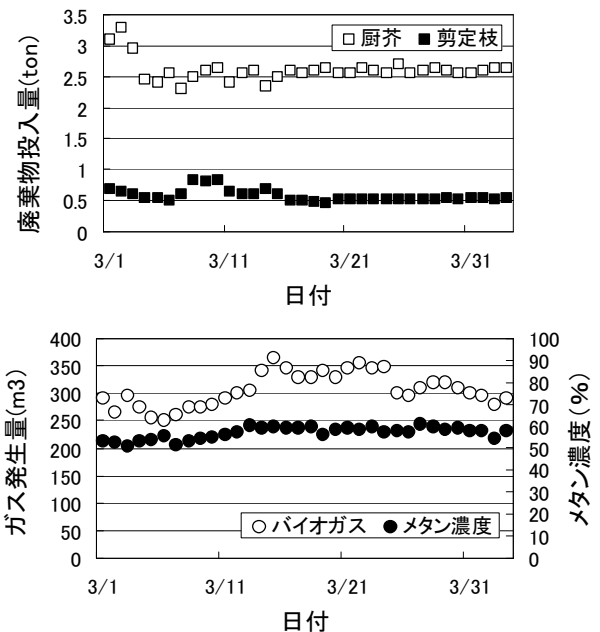


図 5 - 7 原料投入量とガス発生量<sup>9)</sup>

本結果によれば、とりあえず欧州で行われているメタン発酵は同様に日本でも行うことができるということを示すことができた。しかし現実問題としては、ホテル厨芥も剪定枝も一般にはない材料である。特に問題は、剪定枝に変わる、高固形物でありながら、かつタンパク質濃度の低い原料である。それが更にバイオガス発生率の高い原料であれば更に良い。

### 5.2.3 紙類のメタン発酵

押出し流れ高温メタン発酵の DRANCO システムは、欧州でのプラント原料として、厨芥と紙ごみが混合したグレイウエイストについてのメタン発酵を推薦していた。そのようなごみの構成はプラスチックごみを除いて収集の行われる東京や関東の都市部では一般的なごみである。そこで、本プラントでは、まずは現場実験で紙ごみのメタン発酵実験を行った。また同時に剪定枝のメタン発酵実験も行うとともに、その際には発酵温度も、それぞれ 37℃と 55℃で行って、その分解性の違いをみた。その結果を図 5-8<sup>10)</sup>、9<sup>11)</sup>、10<sup>12)</sup>、11<sup>13)</sup>に示す。

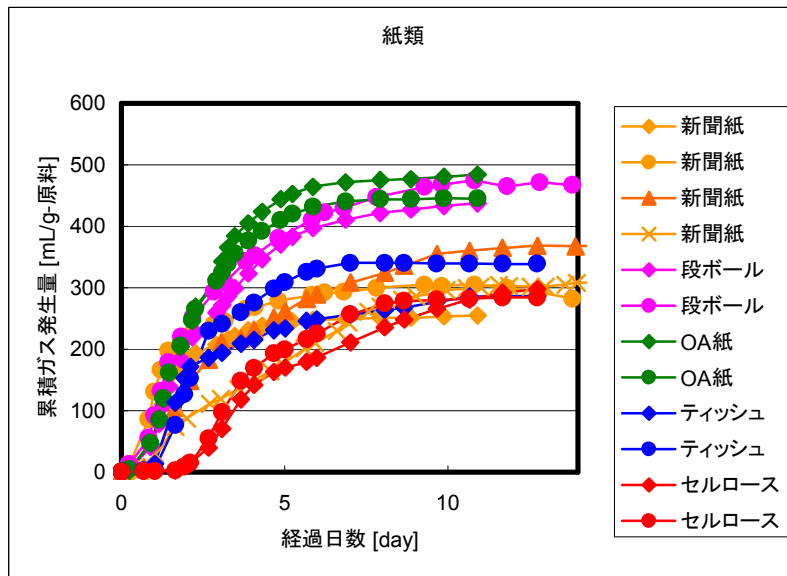


図 5-8 各種紙類の 55℃メタン発酵<sup>10)</sup>

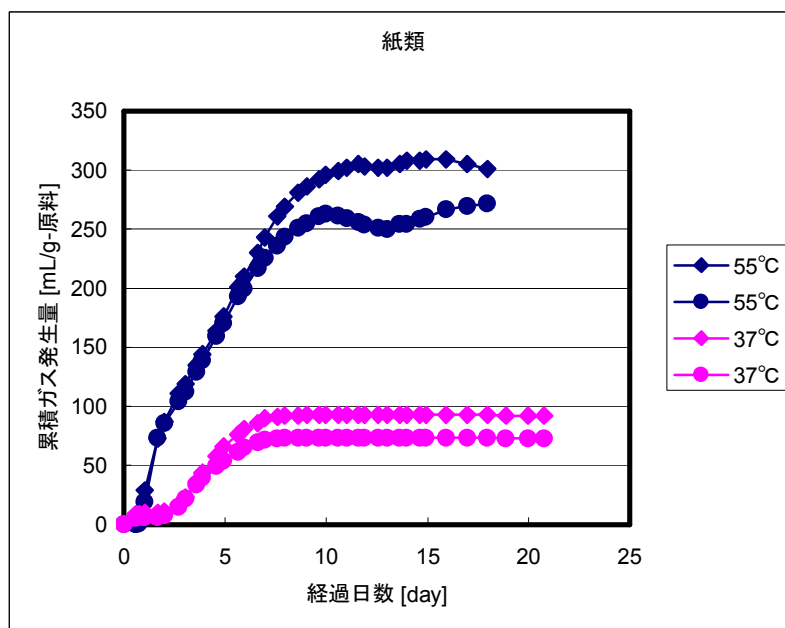


図 5-9 55℃と 37℃での新聞紙メタン発酵<sup>11)</sup>

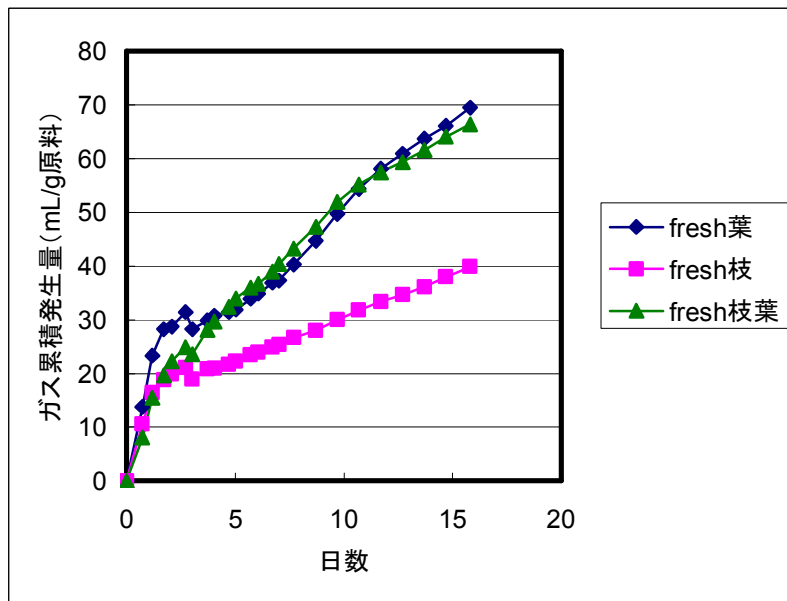


図 5-10 各種剪定枝の 55℃メタン発酵<sup>12)</sup>

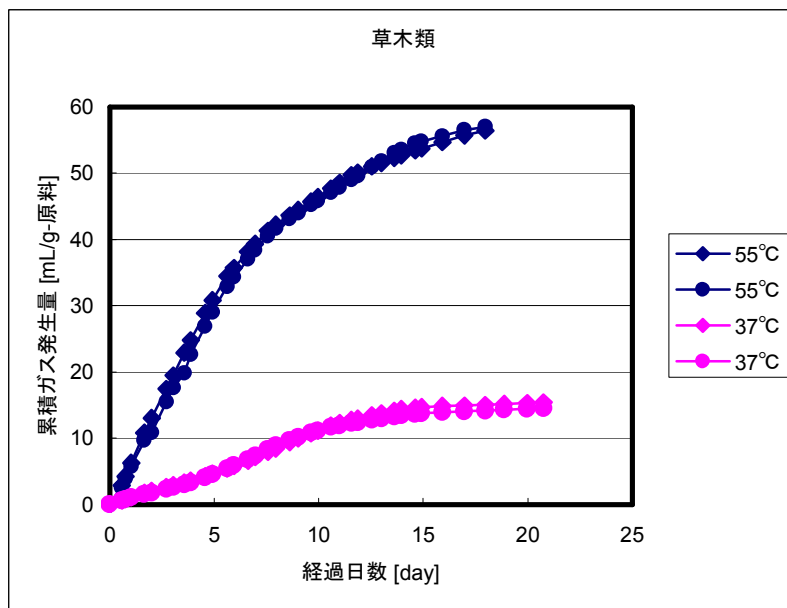


図 5-11 55℃と 37℃での剪定枝メタン発酵<sup>13)</sup>

実験結果では、紙類はその種類によりかなりバイオガス発生量の違いがあるが、剪定枝より総じて発生量が多い。かつその分解は 55℃高温メタン発酵の方が、紙でも剪定枝でも分解性は高く、37℃の中温メタン発酵は低い。

このようなことから、55℃メタン発酵での分解能力の高さが、特に繊維分の多い有機物に対して有利であることが分かる。

剪定枝に求める発酵槽内での物理的機能（沈殿物や浮上物を排出する機能）が紙でも得られるかについては、実際にプラントに流してみないと分からない。このため、図 5-3 に示すようにホテル厨芥＋新聞紙の実験を 5 月から 10 月にかけて行った。その間、ホテル厨芥で窒素分の多いときは水も加えアンモニア態窒素濃度を 3,000ppm 以下にしながら運転した。固形分濃度はそのため十分に上げるまでには至らなかったが、ほぼ予定通りのバイオガス量を安定して得ることができた。

#### 5.2.4 各種固形有機物のメタン発酵

その後、実験ではより欧州でのバイオウエイストに近い原料、すなわち野菜類の多い原料についてもその分解性を確かめるべく、青物市場からの野菜くず投入実験を行った。一口に野菜といってもその種類は多く、一概には論じられないが、市場ごみとして排出されるものは比較的水分が高く、90%以上のものが多く、バイオガスの発生量は多くない。

表 5-3<sup>14)</sup>にこの間行った原料の分析値とバイオガス発生量を示す。

表 5 - 3 有機物原料ごとのバイオガス発生量<sup>14)</sup>

|        | TS<br>(%) | VS<br>(%) | T-N<br>(%-湿式原料) | VS 分解率<br>(%) | バイオガス発生量 (m <sup>3</sup> /t) |
|--------|-----------|-----------|-----------------|---------------|------------------------------|
| ホテル厨芥  | 28        | 92        | 0.96            | 84            | 175                          |
| 紙ごみ    | 93        | 96        | 0.072           | 66            | 490                          |
| 市場野菜ごみ | 10        | 95        | 0.16            | 90            | 70                           |
| 剪定枝    | 59        | 90        | 0.70            | 20            | 85                           |

ここで「ホテル厨芥」とは、宴会残渣など魚肉類油脂類を多く含むカロリーの高い厨芥である。ここでの市場からの「紙ごみ」は主にダンボール系が多かった。「市場野菜ごみ」は季節で異なる。ここでは夏の水分の大きい野菜主体であった。「剪定枝」はある程度まだ緑葉の残った程度のものを投入した。

固形有機物のメタン発酵では、結局、これらの有機物を組み合わせながら、発酵槽内のアンモニア態窒素濃度を 3,000ppm 以下に保ち、プロピオン酸の発生を抑えながら運転することになる。又、固形有機物ではその形状はセルロースやリグニンで作られているものであるから、濃度の薄い発酵槽ではスカムになる。運転では固形物濃度が 8%を越えるあたりから、浮上物や沈殿物の移動が見られ、10%あたりから発酵槽での堆積を排除しながら運転できるようになる。固形有機物が廃棄物であれば、他の分解できないごみの混入避けられず、その排除のために膨大な前処理施設をつけるのを防ぐなら、高濃度基質の維持によ



り発酵槽で対応するほうが、無駄がない。

表 5-3 のような有機物のデータがあれば、様々な原料に対するプロセスの設計が可能になる。ある混合原料について、アンモニア態窒素濃度を 3,000ppm 以下に抑えながら、発酵槽の基質固形物濃度を 10%程度に保つことは可能かどうかを求めることになる。タンパク質の多い原料が中心となる場合は希釈が必要となる。水で希釈していった場合発酵槽内に固形物濃度の維持ができないのであれば、剪定枝や紙ごみの入手可能性を探ることになる。そのように作成した計画につき、そのバランスの可否、水処理の必要性、発生するバイオガス量、発電量、排出される残渣などの想定が可能となり、プロセスの経済性や他の施設との関連などが検討可能になる。

図 5-12, 13, 14 にその例を示す。

図 5-12 では原料を厨芥、紙類、剪定枝とし、必要な厨芥処理量（ここでは 10t/d）を達成するにあたり、紙類や剪定枝をいくら入れれば、発酵槽内のアンモニア態窒素濃度を 0.3%以下、固形物濃度を 10%程度とすることができるとかを検討している。

# KOMPOGAS PROCESS 物質収支全体図現状

厨芥、紙、剪定枝の合計

13 t/d

添加水の量:

3 t/d

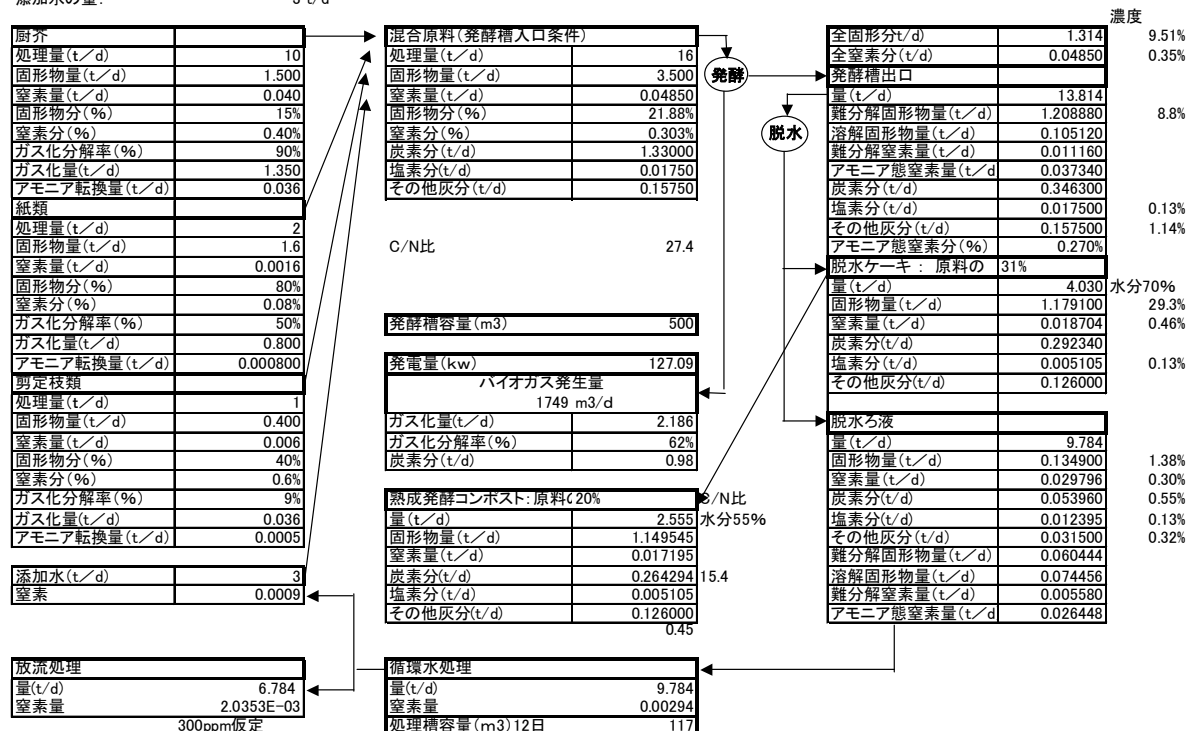


図 5-12 各種固形有機物メタン発酵物質収支全体図

図 5-13 では、図 5-12 のなかの固形分濃度を追いかけて、その収支を示し、図 5-14 では同じく図 5-12 のなかの窒素濃度を追いかけて、その収支を示す。

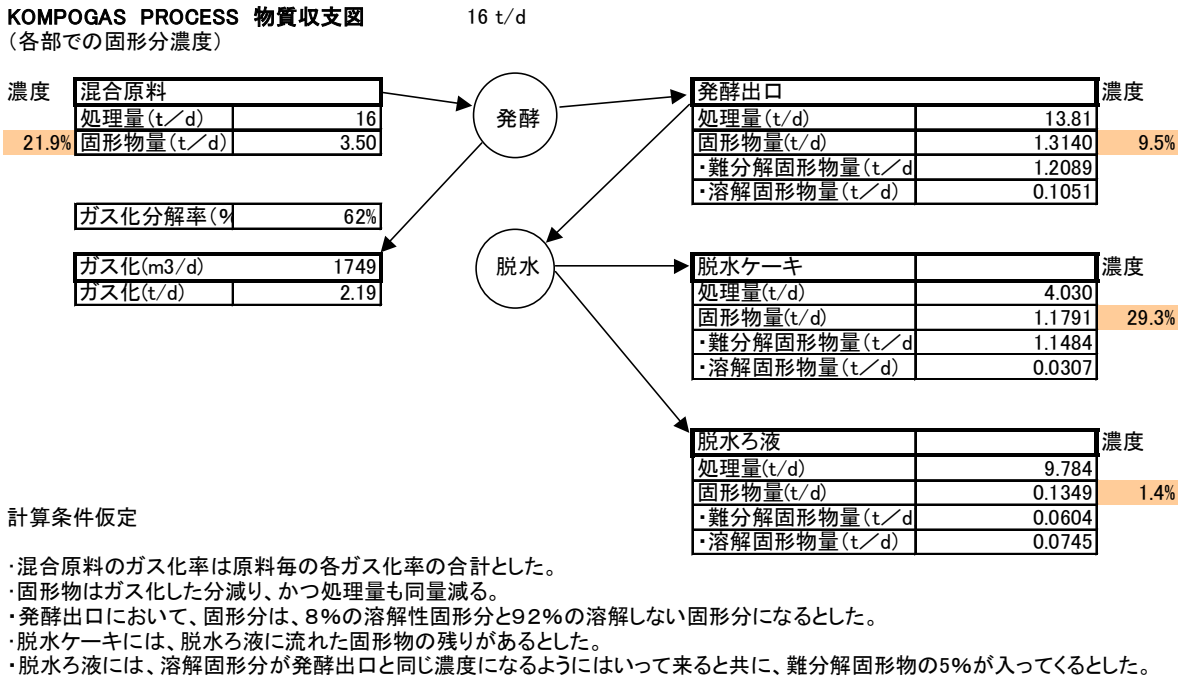


図 5-13 各種固形有機物メタン発酵固形分物質収支

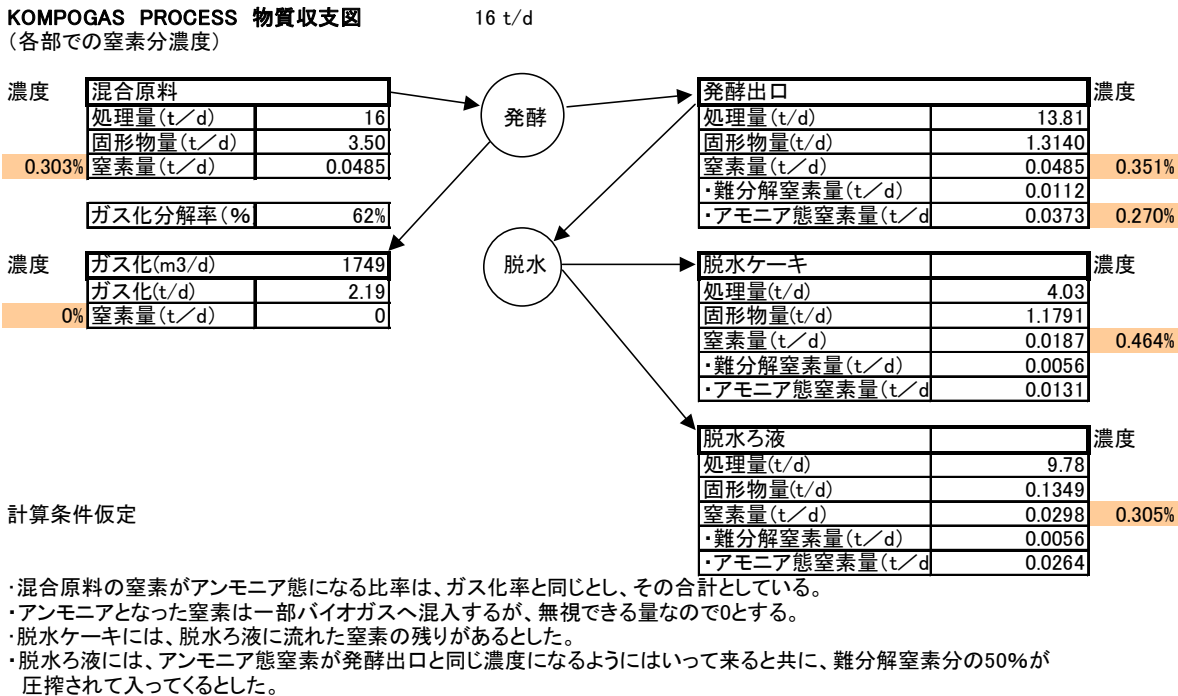


図 5-14 各種固形有機物メタン発酵窒素分物質収支

### 5.3 有機ごみの機械選別及びそのメタン発酵

#### 5.3.1 概要

ごみ処理においては、従来我国ではほとんど焼却によってこれを処理してきた。しかし、資源回収が進む中、水分の多い生ごみなど有機ごみについては焼却だけでなく、メタン発酵によるエネルギー回収を行うことで水分の少ないプラスチック等を焼却する手法が、系全体のエネルギー効率を上げられる場合もある。これを実施するにあたってはごみの分別が必要となる。しかし、家庭ごみ分別は収集コストの増加や行政手続き上の問題から困難な場合が多い。このような場合、収集体制はそのまま、施設側で機械選別することが求められる。

わが国のごみ処理のなかでは、近年環境省から「高効率原燃料回収技術」として原料 t-wet あたり

150m<sup>3</sup>のバイオガス回収がごみ処理メタン発酵における一つのクリアすべき基準として提示されるようになった。実証プラントの各種運転結果の表 5-4<sup>15)</sup>からも分かるように、厨芥や剪定枝だけのメタン発酵ではこれは達成できず、紙ごみまで考えることで達成できる。濡れた紙ごみ等はメタン発酵にまわすことで、メタン発酵での窒素負荷軽減とバイオガス量発生量の増加が期待できる。

そこでごみ処理において、簡易な機械前処理選別により、有機ごみと濡れた紙ごみ類をより多く取り出す分別方法とそのメタン発酵を行い、有効性を検討した。

表 5-4 京都実証プラント各種運転結果 <sup>15)</sup>

|        | 厨芥     | 新聞紙    | 剪定枝    | 原料合計  | ガス発生量              | 原料1トンあたり<br>ガス発生量    |
|--------|--------|--------|--------|-------|--------------------|----------------------|
| 単位     | ton/月  | ton/月  | ton/月  | ton/月 | Nm <sup>3</sup> /月 | Nm <sup>3</sup> /ton |
| 99/6月  | 10.69  | 0      | 2.132  | 12.82 | 796.5              | 62.1                 |
| 99/7月  | 17.038 | 0      | 11.088 | 28.13 | 1,541.90           | 54.8                 |
| 99/8月  | 8.575  | 0      | 11.322 | 19.90 | 322.9              | 16.2                 |
| 99/9月  | 2.67   | 0      | 2.612  | 5.28  | 2,505.90           | 474.4                |
| 99/10月 | 25.134 | 0      | 10.359 | 35.49 | 4,052.00           | 114.2                |
| 99/11月 | 33.58  | 0      | 9.925  | 43.51 | 5,315.50           | 122.2                |
| 99/12月 | 0      | 0      | 0      | 0.00  | 1,343.60           |                      |
| 00/1月  | 11.851 | 5.367  | 5.486  | 22.70 | 2,336.80           | 102.9                |
| 00/2月  | 26.796 | 7.522  | 7      | 41.32 | 6,271.70           | 151.8                |
| 00/3月  | 53.788 | 0      | 20.527 | 74.32 | 9,136.00           | 122.9                |
| 00/4月  | 35.387 | 9.592  | 9.188  | 54.17 | 7,775.90           | 143.6                |
| 00/5月  | 28.402 | 11.236 | 0      | 39.64 | 5,968.90           | 150.6                |
| 00/6月  | 11.019 | 4.173  | 0      | 15.19 | 4,750.90           | 312.7                |
| 00/7月  | 17.882 | 6.688  | 0      | 24.57 | 6,446.50           | 262.4                |
| 00/8月  | 21.464 | 7.648  | 0      | 29.11 | 6,072.90           | 208.6                |
| 00/9月  | 23.897 | 8.155  | 23.897 | 55.95 | 7,323.30           | 130.9                |
| 00/10月 | 24.344 | 7.906  | 7.291  | 39.54 | 7,441.50           | 188.2                |
| 00/11月 | 26.008 | 7.62   | 13.068 | 46.70 | 7,441.20           | 159.4                |
| 00/12月 | 25.691 | 4.372  | 22.496 | 52.56 | 7,465.00           | 142.0                |
| 01/1月  | 21.456 | 0      | 36.809 | 58.27 | 6,406.40           | 110.0                |
| 01/2月  | 24.101 | 0      | 43.799 | 67.90 | 7,348.90           | 108.2                |

(注記:厨芥の量は、水切りされたもので表示)

#### 5.3.2 機械選別

機械選別の方法で最も一般的な選別は、破碎+トロンメルによる篩い選別であ

る。破碎機を通過しても大きいサイズのものはプラスチックや紙ごみが多く、小さくなり易くて重い有機ごみなどなら分別できる。また、この方法では孔の閉塞が避けられないのと、大きさだけで有機ごみや紙は無条件に分別されてしまう。そこで本実験では、図 4-13 で示したトロンメル内部に回転ブレードを有した破碎機構をもつ破碎選別装置を検討することにした。

この破碎選別機の主要部は内部ブレードとスクリーンによって構成され、投入されたごみは回転するブレードにより破碎され、スクリーン径以下のものが選別ごみとして回収される。回収されにくいプラスチック等は排除される。スクリーン径以上のもの、比重の軽いプラスチックや乾いた紙は、このブレード回転で起こる気流に乗り比重選別され残さとして除去される。ブレードは固定刃ではなく、スイングハンマ方式であるため、強固で破碎が困難なものに対し回避でき、異物に強い構造である。このブレードの回転により、孔の閉塞も緩和される。

本実験は、原料性状によって内容が大きく異なるので、実際の都市ごみそのものを対象として実験することとした。機械選別のフローは図 5-15<sup>16)</sup>、その仕様を表 5-5<sup>17)</sup>に示す。収集ごみはホイールローダーにより搬入された状態のまま二軸破碎機に投入し、50mm 程度に破碎された後、破碎分別機に投入される。破碎分別機では選別ごみ（メタン発酵原料）と選別残さ（軽量物）に分別される。処理対象物は 1 日 3～4t-wet 搬入され、機械選別設備の処理能力は 1 時間 0.5～1t-wet である。

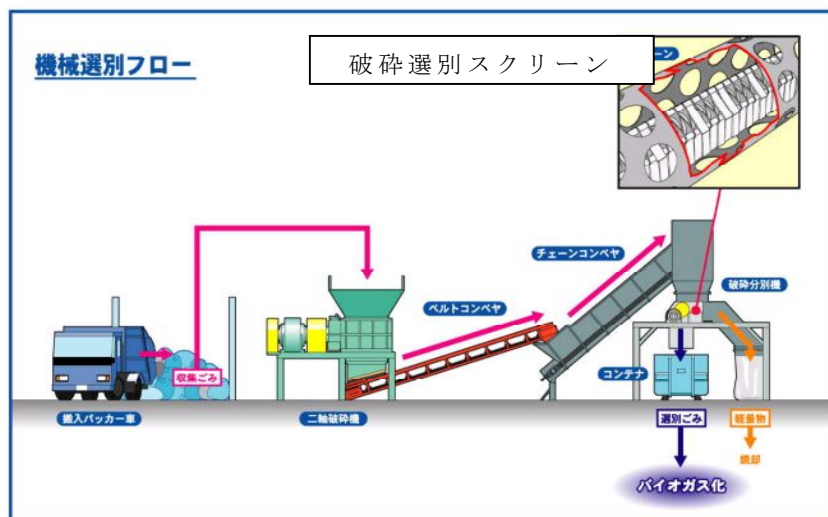


図 5-15 機械選別フロー<sup>16)</sup>

表 5-5 機器仕様<sup>17)</sup>

| 機器名称             | 仕様   |
|------------------|--|
| 二軸破碎機            | 刃幅：50mm<br>電動機：45kW                        |
| ベルトコンベヤ          | ベルト幅：600mm（磁選用の永久磁石設置）                     |
| チェーンコンベヤ         | 有効幅：400mm                                  |
| 破碎分別機            | 処理能力：1t/h<br>電動機：11kW＋0.55kW×2（押込み装置）      |
| コンテナ<br>（選別ごみ貯留） | 容量：6m <sup>3</sup><br>寸法：3.6mL×1.9mW×0.9mH |

### 5.3.3 破碎選別実験

実験原料は京都市が収集した家庭系ごみ（可燃ごみ）を用いた。原料ごみ組成（平均値）を表 5-6<sup>18)</sup>に示す。

表 5-6 原料ごみ組成分析結果（平均値）<sup>18)</sup>

| 項目           | 湿重量比（％） |
|--------------|---------|
| 生ごみ類         | 35.5    |
| 紙類           | 37.8    |
| プラスチック類      | 17.3    |
| 布・革類         | 4.1     |
| その他（金属・ガラス類） | 5.3     |

※草木類は生ごみ類に含む

破碎分別機のスクリーン孔径を 50～100mmφで変化させ、選別の状況を確認した。スクリーン孔径 50 及び 70mmφを用いたときの回収率を表 5-7<sup>19)</sup>に示す。

生ごみは、98%以上とほぼ全量回収することができた。紙類は 35～50%であり、湿った紙は乾燥したものより高い回収率となることが確認された。プラスチック・ビニール類は、25～30%の回収（70%以上を除去）し、メタン発酵装置に悪影響を与えるような大きなものはほぼ除去することができた。100mmφ使用時はプラスチック類の回収率（選別ごみ側への移行）が 50%を超え、選別は不十分であった。

スクリーン孔径 50mmφで得られたメタン発酵原料となる選別ごみの組成を表 5-8<sup>20)</sup>に示す。選別ごみは生ごみ単独の場合に比べ、有機物濃度で 2 倍程

度となりながら、窒素濃度は紙の比率が上がったため低くなっており、よりメタン発酵に適した原料となってきた。

表 5-7 各組成回収率<sup>19)</sup> 単位：%-湿重量

| 項 目            | 50mm φ | 70mm φ |
|----------------|--------|--------|
| 生ごみ            | 98 以上  | 98 以上  |
| 紙類             | 約 35   | 約 50   |
| プラスチック・ビニール類   | 約 25   | 約 30   |
| 布・革類           | 10～20  | 10～20  |
| その他 異物（金属・ガラス） | 約 90   | 約 90   |
| 全体             | 55～60  | 60～65  |

表 5-8 スクリーン径 50mm φ 選別ごみ組成分析結果<sup>20)</sup>

|         | 湿重量比（%） |
|---------|---------|
| 生ごみ類    | 60      |
| 紙類      | 22      |
| プラ類、その他 | 18      |

#### 5.3.4 メタン発酵実験

選別されたごみを京都実証プラントに運び、乾式高温メタン発酵を行った。

このときの選別ごみの投入量およびバイオガス発生量を図 5-16<sup>21)</sup>に示す。同期間中の延べ投入量およびバイオガス・メタンガス発生量を表 5-9<sup>22)</sup>、10<sup>23)</sup>に示

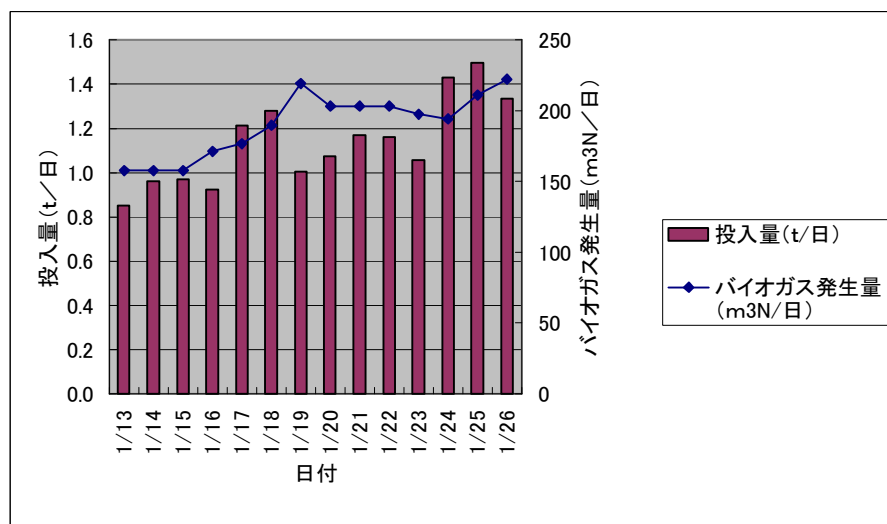


図 5-16 投入量及びバイオガス発生量<sup>21)</sup>

す。この期間の選別ごみのほとんどはスクリーン径 50mm で回収されたものである。投入量あたりの平均バイオガス発生は  $167 \text{ m}^3_{\text{N}} / \text{t-wet}$ 、メタンガス濃度は平均 56%であった。また、異物混入による運転上の支障も生じなかった。

表 5-9 投入選別ごみ組成<sup>22)</sup>

| 項目                | 単位    | 選別ごみ<br>2005年<br>1月19日 | 選別ごみ<br>2005年<br>1月20日 |
|-------------------|-------|------------------------|------------------------|
| 水分                | %     | 64.3                   | 71.2                   |
| 可燃分               | %     | 28.1                   | 21.0                   |
| 灰分                | %     | 7.6                    | 7.8                    |
| T-N               | mg/kg | 4,190                  | 4,920                  |
| COD <sub>Cr</sub> | mg/kg | 430,000                | 390,000                |

表 5-10 投入量-wet およびバイオガス・メタンガス発生量まとめ<sup>23)</sup>

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 投入量 (t)                             | 15.92 |
| バイオガス発生量 (m <sup>3</sup> N)         | 2,665 |
| 投入量あたりバイオガス発生量 (m <sup>3</sup> N/t) | 167   |
| メタンガス量 (m <sup>3</sup> N)           | 1,493 |
| 平均メタンガス濃度 (%)                       | 56.0  |

本期間中を通じてメタン発酵からは安定したバイオガス発生を確認する一方この期間の発酵槽前半部および発酵槽出口のサンプルの分析を行った。その結果を表 5-11<sup>24)</sup>に示す。

表 5-11 発酵槽内基質の分析結果<sup>24)</sup>

| 日付             | 項目                 | 単位    | 発酵槽<br>前半部 | 発酵槽<br>出口 |
|----------------|--------------------|-------|------------|-----------|
| 2006年<br>1月19日 | T-N                | mg/kg | 2,820      | 2,430     |
|                | NH <sub>4</sub> -N | mg/kg | 1,330      | 1,530     |
|                | COD <sub>Cr</sub>  | mg/kg | 40,000     | 24,000    |
| 2006年<br>1月25日 | T-N                | mg/kg | 2,510      | 2,640     |
|                | NH <sub>4</sub> -N | mg/kg | 1,260      | 1,220     |
|                | COD <sub>Cr</sub>  | mg/kg | 43,000     | 24,000    |

発酵槽内のアンモニア性窒素濃度は、おおよそ 1,200～1,500 ppm で、アンモニア阻害を起こすアンモニア性窒素濃度 3,000 ppm を大きく下回ったことが安定した運転が行えた理由でもあった。

### 5.3.5 厨芥、紙ごみをメタン発酵するごみ処理施設の考察

ごみ処理施設においては、メタン発酵では分解できないプラスチックや繊維、木材を含むため、必ず焼却施設との組み合わせとならざるを得ない。このとき厨芥、食品残渣のような水分の多いものはメタン発酵でエネルギーを取り出すとして、紙ごみはどちらの方法で処理することが理にかなうであろうか。紙ご

みのバイオガス発生量を  $490\text{m}^3/\text{t}^{14)}$ 、低位発熱量を  $13,000\text{kJ/kg}^{25)}$  ( $3,106\text{kcal/kg}$ ) として、それぞれの発電効率を 30%、20% とするとき、その発電量は表 5-12 のように計算できる。バイオガスの発電効率はガスエンジン発電機で、規模によっては 40% 近いものもあるが、一般的には 30% 程度のものが多い。焼却による発電では従来のごみ焼却炉の一般的な発電効率は 13% 前後であるが、近年高温高压ボイラを搭載した炉も増えて、これらでは 20% 前後の発電効率も可能になりつつある。

表 5-12 紙ごみ 1 t からの発電量

|        | 取得熱量 (MJ/t)   | 発電効率 | 発電量 (kWh/t) |
|--------|---|------|-------------|
| メタン発酵  | $490\text{m}^3/\text{t} \times 21,000 \text{ kJ}/\text{m}^3 = 10,290,000 \text{ kJ}/\text{t}$ | 30%  | 857         |
| 焼却 (1) | $1,000\text{kg}/\text{t} \times 13,000\text{kJ}/\text{kg} = 13,000,000\text{kJ}/\text{t}$     | 20%  | 722         |
| 焼却 (2) | 同上  | 13%  | 469         |

結局、紙ごみだけの焼却では 20% を超す効率の発電ができる大型炉でなければ、メタン発酵発電には追いつかないことが分かる。中小の焼却施設 ( $50 \sim 150 \text{ t-wet}/\text{d}$ ) ではこのような高効率発電とはならないため、メタン発酵発電が有利となる。原料が厨芥の多いだけのごみでは焼却はもちろん、メタン発酵でもそのもともとの熱容量の低さのためバイオガスの収量も少なく発電も少なくなるが、 $150 \text{ m}^3/\text{t-wet}$  程度のバイオガス発生量があれば様々な考え方ができる。

例えば中小のごみ処理施設ということで、発電はバイオガス発電のみとする場合を考えてみる。バイオガス発電はガスエンジンであるため、蒸気タービン発電にくらべコストも低く、運転資格者の問題もない。施設全体を図 5-17 のような構成とし、紙ごみや厨芥を主体にして例えば半分程度をメタン発酵発電とし、半分は焼却とする。こうすると、メタン発酵発電で全施設の運転動力をまかなえ、更にろ液は焼却排ガス冷却に利用して無放流とすることも可能になる。発酵残渣については、うまく異物除去できればコンポスト利用も可能であるが、原則は焼却できるようにする。発電量を確認してみる。この場合のメタン発酵原料としては厨芥が 50%、紙ごみが 30%、その他が 20% の構成とすれば、バイオガス発生量で  $210 \text{ m}^3/\text{t-wet}$  あり、 $390\text{kWh}/\text{t-wet}$  の発電が出来る。メタン発酵原料と焼却用原料が半々で、それぞれの自己消費電力は  $100 \sim 150\text{kWh}/\text{t-wet}$  であるため、この発電でほぼ全体を賄うことが可能となる。即ち  $150 \text{ m}^3/\text{-wett}$  に拘らず更なるガス発生量を確保することで、このような仕組み



が可能となってくる。

大型のごみ処理施設ではどのようなになるか。焼却炉が大型化し発電施設として蒸気タービンが可能となるなら、バイオガスは発電だけでなく、収集車燃料や、灰溶融燃料や、スーパーごみ発電燃料など様々な用途が広がってくる。これらは、都市の特性に合った使い方でその効果をより豊かにすることが可能である。

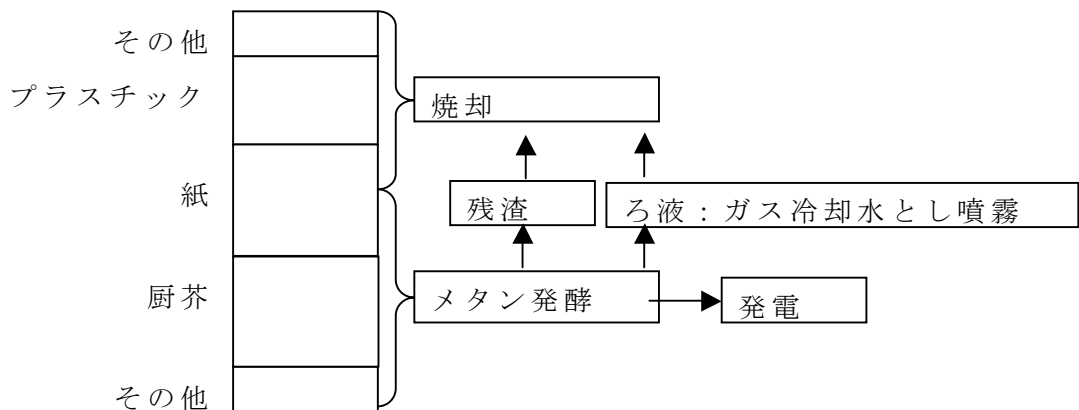


図 5-17 中小ごみ処理施設：無放流、発電付（電力自給）

## 5.4 南丹市商用メタン発酵プラント

### 5.3.1 概要

南丹市に 2003 年建設された KOMPOGAS 式メタン発酵プラントは 50t／日で「カンポリサイクルプラザ」と称する商用プラントである。このプラントでは上記提案のシステム設計を行った。ここには既に民間の廃棄物焼却施設があったので、その横に本メタン発酵プラントを設置することで、集められた廃棄物のうち水分の多い有機性の事業系廃棄物や産業廃棄物ならびに地域家庭ごみの厨芥が分別された一般廃棄物はメタン発酵へ運ばれ、一方プラスチック廃棄物や木質系廃棄物等は焼却設備の原料として供することとした。

メタン発酵の原料有機物は変化に富み、近郊から排出される容器包装プラスチックを分別した後の可燃ごみ（ビニール袋入）、食品工場の賞味期限切れ食品（袋、ダンボール、缶入）および加工残渣、飲料水などの廃液、下水汚泥など様々な有機性廃棄物を受入れて処理している。事業系一般廃棄物については各市町村のごみ処理施設に流れることが多い。ただ、食品リサイクル法の規制に適合することが必要な部分については、単なる焼却はリサイクルと認められていないので、このようなメタン発酵施設に送られることになり、食品工場の産業廃棄物が原料となることが多い。

### 5.4.2 プラント概要

メタン発酵バイオリサイクル施設のプラント概要を表 5-13<sup>26)</sup> に示す。施設の処理能力は、固形廃棄物および液状廃棄物を合わせて1日に50ton 処理することが可能で、最大 9,850Nm<sup>3</sup>/日のバイオガスを回収して 620kW の発電も行うことができる。また、嫌気処理後の発酵液は残さとろ液に分離した後、残さは堆肥化し、ろ液は排水処理後焼却施設のガス冷却水として再利用している。処理フローを図 5-18<sup>27)</sup> に示す。

表 5-13 バイオリサイクル施設概要<sup>26)</sup>

| 項目     |       | 単位                | 能力&方式     |
|--------|-------|-------------------|-----------|
| 処理能力   |       | ton／日             | 50        |
| 前処理方式  |       | —                 | 二軸二段破碎&磁選 |
| 発酵設備   | 発酵槽容量 | m <sup>3</sup>    | 1150×2槽   |
|        | 発酵温度  | ℃                 | 55        |
|        | 発電機   | kw                | 310kW×2台  |
|        | 自動車燃料 | m <sup>3</sup> ／日 | 55.2      |
| 排水処理設備 | 処理方式  | —                 | 生物処理&凝集沈殿 |
|        | 処理能力  | m <sup>3</sup> ／日 | 85        |
| 堆肥設備   | 切返方式  | —                 | ホイールローダ   |
|        | 選別方式  | —                 | トロンメル     |

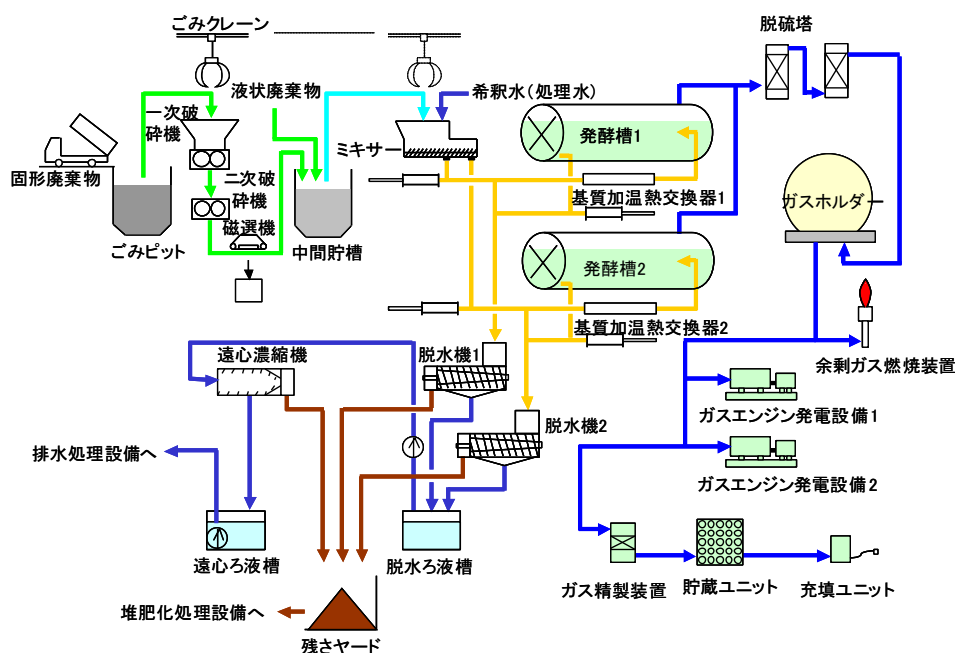


図 5-18 処理フロー<sup>27)</sup>

## 1) 受入れ供給工程

可燃ごみなどの固形廃棄物は、パッカー車等で搬入されごみピットに一旦貯留されるが包装されている（図 5-19 参照<sup>28)</sup>）。

ごみピットのごみは、ごみクレーンにより一次破砕機に投入されて 100mm 程度の大きさに破砕され、その下部の二次破砕機により数 10mm 程度に破砕され、磁選機により磁性物を回収して中間貯槽へ送られる（図 5-20 参照<sup>29)</sup>）。包装材も中身もここでは混合しており、これがそのまま発酵原料となる。湿式のメタン発酵と大きく異なる原料である。



図 5-19 搬入廃棄物<sup>28)</sup>



図 5-20 破砕ごみ（場所：中間貯槽）<sup>29)</sup>

## 2) メタン発酵工程

図 5-20 の中間貯槽のごみをごみクレーンによりミキサーから発酵槽へ送るが、投入されたごみの性状にともない、その重量に対して一定の希釈水を流動性や窒素濃度をみて、追加投入して混合する。そしてその基質を発酵槽へ供給する。この希釈水は、発酵残渣を脱水した濾液の排水処理設備で窒素除去だけできた水を使用する。SS の混入は許される希釈水となる。

発酵は 55℃ の温度を採用した高温メタン発酵であり、発酵槽は KOMPOGAS 式円筒横型槽で、原料を片側から供給し、反対側から排出をおこなう連続式の押出し流れ方式（プラグフロー）となっている。発酵槽での滞留時間は 20～25 日で、内部には常時低速の攪拌機が回転している。

また、発酵後の残さの一部を返送して、原料への植菌を行い、酸発酵する入口部から直ぐメタン発酵させて嫌気分解の促進を行っている。

### 3) 脱水残さ工程

嫌気分解後の発酵液は、発酵槽の下流側から引抜かれスクリーンプレス脱水機にて無薬注で残さと脱水ろ液に分離される。さらに脱水ろ液から無薬注遠心濃縮機にて固形物を除去し、ろ液は排水処理設備に送られる。ケーキに薬品が入らず堆肥化で安全であると伴に、SS 回収率が低くても原料の希釈水として利用するのには支障がない。維持費も高騰しない。

### 4) 堆肥化処理工程

脱水機で分離された残さ・固形物は、脱アンモニア貯留（残さ）ヤードにてアンモニア分を短時間で発散させた後、熟成ヤードに移される。なお、アンモニア成分を含む臭気は、隣の焼却施設の燃焼空気として高温熱分解により処理される。

熟成ヤードでは数週間切返しを行い二次発酵処理され、熟成された後、選別装置（トロンメル）によりビニール等の異物を取り除き、堆肥とする。堆肥の不適物であった異物については、焼却施設で焼却処理される。

### 5) ガス利用工程

バイオガスは、脱硫装置（酸化鉄）により硫化水素が除去され、ガスホルダーに一時貯留され、ガスエンジンおよびガス精製装置に送られる。

ガスエンジンは 310kW／台の発電機が 2 台設置されており、発電および温水による熱回収のコージョネレーションを行っている。発電された電力は焼却施設の動力源としても利用され、更に余剰電力の出るときは RPS 法の認定電力として関西電力へ売電する。熱は発酵槽の加温に利用される。

バイオガスの精製フローを図 5-21<sup>30)</sup>に示す。ガス精製装置はバイオガス中微量不純物（硫化水素、アンモニア、水分）を活性炭除去し、さらに二酸化炭素を 2% 以下まで PSA 装置で取り除き高純度メタンガスを精製する。最後は、精製ガスにプロパンガスを数% 混合し天然ガスに近い発熱量とし、圧縮により高压ボンベに充填保管している。このガスは構内用の CNG 駆動フォークリフト等の燃料として利用している。

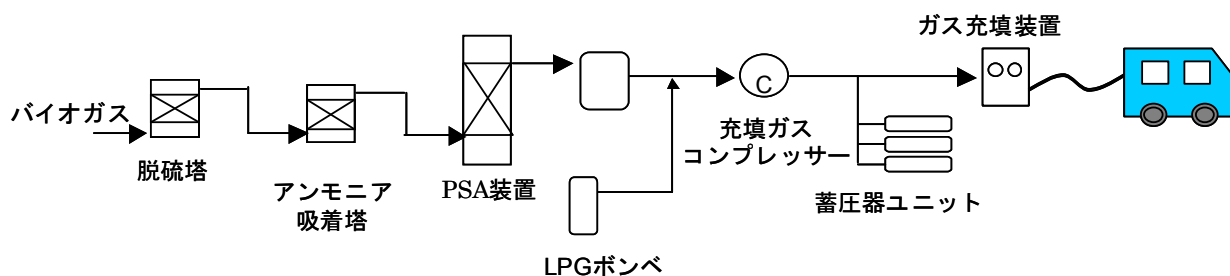


図 5-21 バイオガス精製フロー<sup>30)</sup>

## 6) 排水処理工程

排水処理設備では、脱窒処理で有機物と窒素成分が同時に除去され、一部の脱窒処理水がミキサーで発酵槽投入基質の調整用として使用される。さらに余剰の脱窒処理水は凝集沈殿工程にてSS（固形物）を除き、処理水は隣の焼却施設のガス冷却水として全量利用される。このためメタン発酵と焼却施設の全体施設としては無放流となっている。

### 5.4.3 運転結果

#### 1) 搬入廃棄物

搬入された廃棄物の組成分析例を図 5-22<sup>31)</sup> に示す。なお、分析は二次破砕機出口でサンプリングしたごみを①金属、②プラスチック、③布、④紙、⑤草木、⑥ビニール、⑦アルミ、⑧発泡スチロール、⑨厨芥類の9項目に分類し、各項目の重量比率を測定した。

搬入されたごみのうち、メタン発酵可能なものは、④紙、⑤草木、⑨厨芥類であり、全体のうちの約70～80%を占めていた。また、表

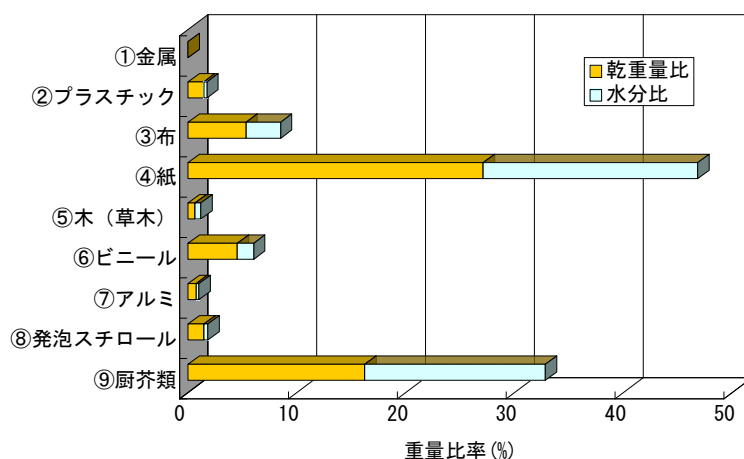


図 5-22 搬入廃棄物の組成分析例<sup>31)</sup>

5-3では紙類および厨芥類の固形物濃度はそれぞれ93%および28%であったことから、この分析での紙の水分というのは、厨芥類の水分が紙類に吸収されたものと考えられる。したがって、搬入廃棄物の50%程度が厨芥類であり、紙類は30%弱程度であったと推察されるが、固形分としては紙のほうが多い。

#### 2) 発酵槽投入基質の性状

発酵槽への投入基質の固形物濃度(TS)、有機物濃度(VS)、全窒素濃度(T-N)の分析結果の一例を図 5-23<sup>32)</sup> に示す。なお、TSは20%前後に調整している。

TSおよびVSはそれぞれ15～25%、80～95%-TSで推移したが、T-Nは3,000～8,000mg/kg（平均4,100mg/kg）と大きく変動した。これは、本施設で受入れている厨芥類は動物性厨芥が多く、その種類によってはタンパク質濃度を推定して、希釈量を決定せねばならず、日によってその質と量が変わったことに起因するためと考えられる。収集される廃棄物はその処理費の高いものが優先されるため、処理困難な原料が集まる傾向になり、都市一般廃棄物とは性状が大きく異なる。

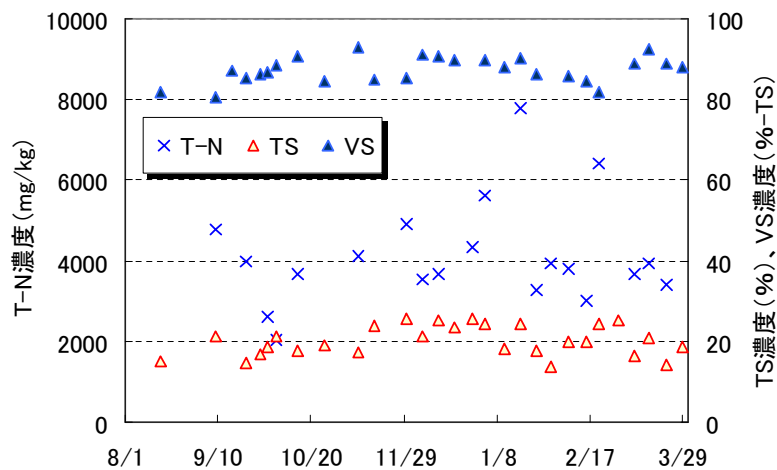


図 5-23 発酵槽投入基質の性状<sup>32)</sup>

### 3) バイオガス発生量

ごみ投入量と発生したバイオガス量の日推移を図 5-24<sup>33)</sup> に示し、投入ごみあたりのガス発生量（バイオガス発生量/ごみ投入量）を表 5-14<sup>34)</sup> に示す。ここに示す投入ごみの構成は図 5-22 に示すように、各種異物が混入しているが、更に原料も蛋白性の日も油脂性品の日もあり、さらには液状有機性廃棄物も入り、極めて変動の大きい負荷状況であった。

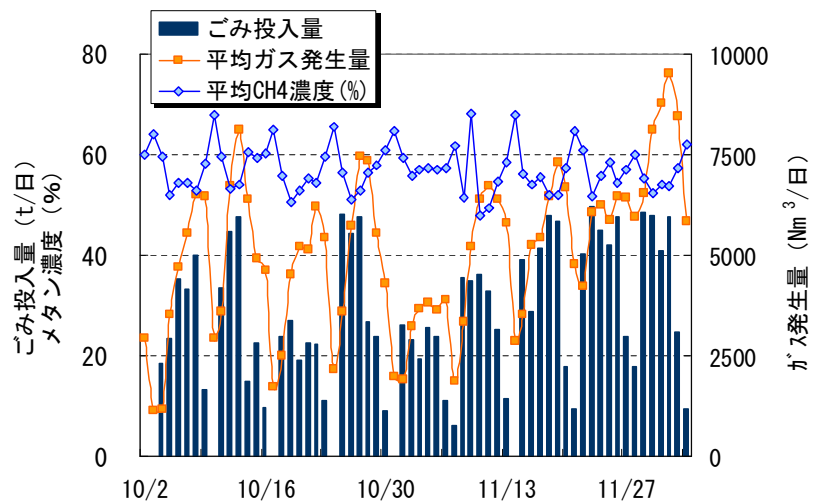


図 5-24 ごみ投入量とバイオガス発生量の推移<sup>33)</sup>

表 5-14 投入ごみトン当たりのガス発生量（月平均）<sup>34)</sup>

| 項目           | 単位                           | 2004/10 | 2004/11 | 2004/12 | 2005/1 | 2005/2 |
|--------------|------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 投入ごみ当りのガス発生量 | Nm <sup>3</sup> -乾式/t-ごみ-wet | 221     | 180     | 223     | 175    | 223    |
| VS 分解率       | %                            | 85      | 73      | 78      | 73     | 75     |
| メタン濃度        | %                            | 57.9    | 56.7    | 58.5    | 58.2   | 57.9   |

表 5-14 のバイオガス発生量について考察する。ここでは食品残渣以外に梱包用

ダンボールや紙袋、また地域の可燃ごみもそのまま入ってきており、全て破碎した後、磁選で金属を除いただけで、そのまま発酵槽に投入している。そのため原料には異物も多いが紙ごみも多い。欧州のバイオガスプラントの運転報告でも原料 t-wet あたり 200 m<sup>3</sup> バイオガス発生する施設はほとんどない。

しかし、この原料構成について、京都市実証プラントから得た表 5-3 の数値を当てはめてバイオガス発生量を計算してみると表 5-15 のようになり、200 m<sup>3</sup>/t-wet 以上のバイオガスが発生することが納得できる。尚、食品ごみ（事業系）についての発生ガス量は家庭ごみ（125 m<sup>3</sup>/t）と事業系ごみ（175 m<sup>3</sup>/t）との中間値 150 m<sup>3</sup>/t-wet としてみた。

表 5-15 カンボでの原料構成例および発生ガス量試算-wet

| 原料                | 構成割合 | ガス量仮定                 | 合計                      |
|-------------------|------|-----------------------|-------------------------|
| 食品ごみ（産廃系、事業系、家庭系） | 55%  | 150 m <sup>3</sup> /t | 225 (m <sup>3</sup> /t) |
| 紙ごみ（段ボール、紙袋、紙屑等）  | 29%  | 490 m <sup>3</sup> /t |                         |
| 発酵不適物（プラ、布、ビニール等） | 16%  | 0                     |                         |

#### 4) 物質収支

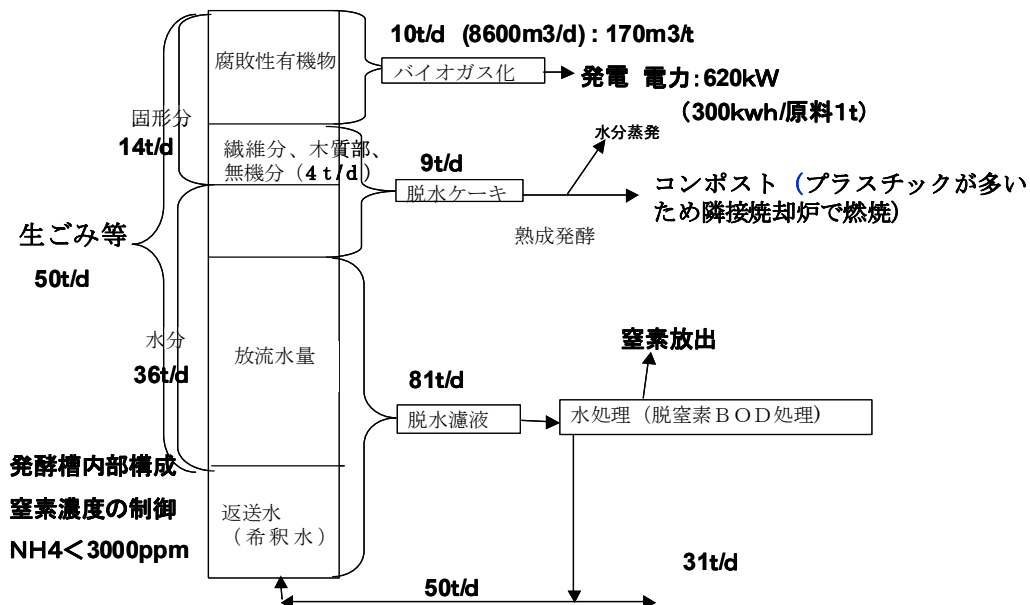


図 5-25 物質収支図

計画時点での物質収支を図 5-25 に示す。固形分濃度として、京都実証プラントで経験したホテル厨芥での値 28% を仮定した。また、窒素濃度も希釈水量 50 t/d とし、最悪 2 倍希釈しないとおさまらない原料もくると考えた。



一応、このような原料にも耐えるとしたが、実際には魚肉系、大豆食料系などの高タンパク質濃度の廃食品もあり、水だけでなく他の材料との混合希釈なども考慮し、とにかく発酵槽内アンモニア態窒素濃度が 3,000ppm を切る運転を目指した。

実際の運転では、希釈水量は 30 t / d あたりで推移した。これは原料が 50t / 日にはなかなか達しないため、ひとつの要因はバイオガスになる固形分比率が実際はもっと高く、 $170\text{m}^3/\text{t-wet}$  ではなく、表 5-14 の  $200\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合もあり、そうすると発電機容量が追いつかず、余剰ガスバーナーを焚くことになるので、その面から処理量が抑えられたこともあった。

脱窒素 BOD 処理した水は希釈水として利用されるが、残った水は凝集沈殿で SS を除去されて、隣接焼却炉のガス冷却水として利用できた。又、残渣に含まれる、堆肥にできない異物、即ちプラスチックやビニール、金属類も同じく隣接焼却炉に持ち込まれ熱分解することになった。異物を分別した原料が持ち込まれるならよいが、賞味期限切れ食品廃棄物などは商品として既に梱包されているため、そこで中身だけしか引き取らないと言うことはできない。引き受けた後も、こちらで人手なり機械なりにかけて分別するようでは処理費が賄えない。結局、このプラントのように全て発酵槽に入れた後、腐敗しない残渣の状態で分離して処理する形にならざるを得ないと考える。

焼却炉が隣接しているため、これらの系外への排出物が合理的に処理できる。又、隣接炉では発電をしていないため、このバイオガスプラントの余剰電力をその炉運転動力に使用することが優先する。日本では未だ買電力料金が、RPS 売電力料金より高いため、そのような選択となる。

## 5) バイオガスの利用

### ・ガス発電効率

発電はバイオガスを、硫化水素除去し一旦ガスホルダーに貯蔵した後、ガスエンジン発電機により発電を行なった。発電効率は月間平均で 32.0～34.6% (平均 33.3%) であった。定格運転時の効率が平均で約 34.7% であったこと、75% 負荷時の効率が平均で 32.1% であったことからすると、ガス発電は設計値と同程度の性能が発揮できていると考えられる。

投入ごみ 1 t -wet あたりのバイオガス量およびメタン濃度がそれぞれ平均で  $205\text{Nm}^3/\text{t}$  および 57.8% であった。この値は、計算上、投入ごみ 1 t -wet あたりの発電量は約  $413\text{kWh}/\text{t}$  とすることができる量である。原料性状で異なるが、 $400^\circ\text{C}$ 、4MPa ボイラを搭載した  $150\text{t-wet}/\text{d}$  ごみ焼却炉でも、その実質発電量は約  $500\text{kWh}/\text{t-wet}$  程度であるからして、これからすると、効率的に電力が得られていることが判断される。



・ガス精製装置

ガス利用の一環として、本プラントではガスの二酸化炭素を除去して、メタンリッチのガスとし、これを車両燃料に使っている。装置は小規模ではあるが、バイオガスの車両燃料化装置としては我国では最初の商用プラントとなる。

精製装置では1日に55.2Nm<sup>3</sup>の自動車用燃料ガスを製造することが可能である。表5-16<sup>35)</sup>は精製前後のバイオガスの分析結果例である。バイオガスのメタン濃度は58.8%であったが、精製後のメタン濃度は95%程度まで高純度化されており、発熱量も天然ガス(13A)と近い発熱量となった。

表 5-16 精製バイオガスの分析結果 <sup>35)</sup>

|                               | 単位                 | 発酵槽<br>出口 | ガス精製装置<br>出口 |
|-------------------------------|--------------------|-----------|--------------|
| CH <sub>4</sub>               | %                  | 58.8      | 94.8         |
| CO <sub>2</sub>               | %                  | 38.3      | 0.6          |
| H <sub>2</sub> S              | ppm                | <0.1      | <0.1         |
| NH <sub>3</sub>               | ppm                | 0.2       | 0.2          |
| H <sub>2</sub>                | %                  | 0.7       | 0.2          |
| N <sub>2</sub>                | %                  | 0.3       | 1.0          |
| O <sub>2</sub>                | %                  | 0.1       | 0.3          |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | ppm                | <10       | 19,000       |
| 水分                            | %                  | 1.3       | 0.0          |
| 低位発熱量                         | kJ/Nm <sup>3</sup> | 21,181    | 35,790       |

バイオガスエネルギーを電力として利用するのか自動車燃料とするのかは、その国の政策によって大きく異なってくる。我国の電力買取単価は未だ諸外国に比べ低い。自動車燃料の高騰があれば、容易に逆転して車両燃料に利用するほうが優位になる。しかし我国では、自動車燃料については車検制度の中で規定されており、新たな燃料を利用することは単独では事実上不可能に近い行政上の仕組みがある。従って本施設においても構内用フォークリフト車にしか使用していない。本来は収集車両まで利用することで、有機物排出先にその利用形態を見せることができ、分別の重要性を訴えることができる。

## 6) プラント電力収支

定負荷時(固形廃棄物投入量46t-wet/日、液状廃棄物2~4t-wet/日)における消費電力量は、排水処理、建築物での動力・照明等も含めて5,500kWh/日と

なり、そのときのバイオガスによる発電電力量は 14,800 k W h / 日（最大）となった。

原料 t -wet になおすと、消費電力量は 120 k W h / t となり、ほぼ焼却施設と同じ程度といえる。バイオガスによる発電量は本ケースの場合 321 k W h / t となる。これは発生するバイオガス量が、発電機の処理能力を超えて発生するため、原料 t -wet あたりの発電量は少ない表示となる。

しかし、これでも 200 k W h / t -wet の余剰電力を発生することが可能になるわけで、50 t -wet/日規模の廃棄物処理プラントで、そのような余剰電力を発生できるプラントは、焼却では困難である。ガスエンジン発電を利用できるメリットがここにある。

## 5.5 まとめ

固形有機物メタン発酵の実プラントでの利用は我国ではまだ多くない。京都実証プラントと南丹市に建設された我国最初の KOMPOGAS 式の乾式メタン発酵プラントからは、当初予想していなかった諸点が明らかになってくるとともに多くの知見を得ることができた。また実証プラントでは平行して実験も行い、紙ごみのメタン発酵特性を得、家庭系可燃ごみから機械選別により得られたメタン発酵原料を運転してとしてその性能も確認した。

本章では以下の結論を得た。

- 1) わが国で初めて建設された KOMPOGAS 式固形有機物メタン発酵プラントは京都市での 3t-wet/d 実証プラントである。ここでは当初分からなかった固形有機物のメタン発酵に関する諸問題点が明らかになってきた。廃棄有機物の種類は多く、その中には窒素濃度の高い場合があり、発酵で発生するアンモニア態窒素は 3,000ppm を越すと発酵阻害が起こるので、原料構成により予防する必要があること。発酵槽内部の汚泥濃度が 10% 付近に上がってくると異物を排除できるようになることなどが明らかになった。
- 2) 実証プラントではその汚泥を使いながら紙ごみ等のメタン発酵実験も行った。新聞紙では、55℃ 高温メタン発酵の分解量は 37℃ 中温発酵の場合の 3 倍程度あることや、55℃ 高温メタン発酵においても紙の種類によってバイオガス発生量は大きく異なり、OA 紙やダンボール紙は新聞紙に比べ 1.5 倍程度バイオガス発生量が多いことが明らかになった。紙ごみはこのような分解できることと、窒素含有率が極めて低いことから、メタン発酵原料として優れていることが明らかになった。
- 3) わが国のごみ処理のなかでは、近年環境省から「高効率原燃料回収技術」として原料 t -wet あたり 150m<sup>3</sup> のバイオガス回収がごみ処理における一

つのクリアすべき基準として提示されるようになった。厨芥しか考えないメタン発酵ではこれは達成できず、紙ごみまで考えることで達成でき、そうならば従来の焼却などと比較してもエネルギー観点からもメタン発酵を考えることができるようになることが明らかになった。

- 4) 原料 t-wet あたり  $150\text{m}^3$  のバイオガス回収基準が可能な家庭系可燃ごみの選別実験をした。湿った紙ごみ等を含む家庭系可燃ごみを機械選別によりメタン発酵原料として利用できるようにして原料 t-wet あたり  $150\text{m}^3$  以上のバイオガス回収を目指した。機械選別ではスイングハンマー式の破碎選別スクリーンにおいてスクリーン孔径  $50\text{mm}\phi$  にすることで、生ごみ 98%、紙ごみ 35% プラスチック・ビニール類は 25% 回収することができて、これを実証プラントで高温メタン発酵運転することで、原料 1 t-wet あたり  $167\text{m}^3$  のバイオガス回収ができた。
- 5) このことで、ごみ処理も焼却一辺倒でなく、メタン発酵と組み合わせたシステムを考えることで、小規模ごみ処理施設でも発電ができて、自らの運転電力を賄いながら従来と同じように汚水をガス冷却に利用して無放流とすることも可能性が出てきた。
- 6) 最後に我国最初の高温乾式メタン発酵商用プラントの運転状況について検討を試みた。食品の賞味期限というルールの中かで発生する高濃度有機物について、食品リサイクル法に合致した施設として建設され高度なりサイクル結果を残した。実際の運転においては、様々な原料有機物について窒素濃度と固形分濃度を推定や分析を行いながら添加水量や投入負荷量を決める必要があり、簡単な運転ではない。又、プラスチックの混入も大量の投入には問題が生じた。窒素濃度の高い原料が来て、これを希釈すると固形分濃度が薄くなり、スカムや沈殿物の問題は直ぐに起こることも経験した。ただ全体を通じては賞味期限切れの食品は紙容器梱包が多く、一般廃棄物のごみも紙ごみが混入してくることで、安定した運転ができた。性能運転では原料 t-wet あたり  $200\text{m}^3$  のバイオガス発生があり、 $200\text{kWh}$  /原料 t-wet の余剰電力を発生し、発酵槽内アンモニア態窒素濃度も  $3,000\text{ppm}$  以下とした運転ができた。併設された焼却施設との関係では、メタン発酵からは電力と水の供給を炉に行い、炉はメタン発酵から排出されるプラスチックや分解できない木質などを引き取り焼却するという関係が成立した。これは 5) で見た小規模ごみ処理施設の形の具体化でもあった。

## 第 5 章 参考文献

- 1) 河野孝志、益田光信、平尾知彦：有機系廃棄物再資源化実証プラントの報告、第 11 回廃棄物学会研究発表会, p. 268 (2000)
- 2) 前述 1) p. 269
- 3) 4) 財) クリーンジャパンセンター：有機系廃棄物再資源化実証プラント実証実験報告書, p. 21 (2001)
- 5) 6) 7) 前述 3) p. 53
- 8) 前述 1) p. 269
- 9) 前述 1) p. 270
- 10) 前述 3) p. 54 参照
- 11) 日本有機資源協会：発見！活用！バイオマス、バイオマス利活用コーディネーター育成テキスト, p. 235 (2007)
- 12) 13) 前述 3) p. 54 参照
- 14) バイオガス研究会：京都バイオガス化技術実証プラント実証試験報告書. pp. 6-8 (2000)
- 15) 前述 14) p. 22 参照
- 16) 環境省：平成 17 年度 次世代廃棄物処理技術基盤整備事業補助金、乾式メタン発酵法による高効率原燃料回収技術の開発、技術開発報告書 p. 2 (2006)
- 17) 前述 16) p. 3
- 18) 前述 16) p. 6
- 19) 前述 16) p. 10, p. 12 参照
- 20) 前述 16) p. 14 参照
- 21) 22) 23) 前述 16) p. 19
- 24) 前述 16) p. 20
- 25) 社) プラスチック処理促進協会ホームページ：高い発熱量は貴重なエネルギー <http://www.pwmi.or.jp/pk/pk04/pkflm411.htm>
- 26) 27) 河村公平他、カンポリサイクルプラザにおけるバイオリサクル施設の運転報告、タクマ技報, Vol. 13, No. 1, p. 32 (2005)
- 28) 29) 30) 前述 26) p. 33
- 31) 32) 前述 26) p. 34
- 33) 34) 前述 26) p. 35
- 35) 前述 26) p. 36

## 第 6 章 結論

### 6.1 本論文の成果

本論文では、我国においても実施が始まった固形有機物メタン発酵について、発展の歴史や、他の方式との比較、コンポスト化との違い、現状での利用などについて研究し、以下の結論を得た。

**第 2 章では固形有機物高温メタン発酵の経緯と展開について研究した。**

- 1) 固形有機物のメタン発酵については、欧州で発達し、それぞれの国でも使用が検討されているという状態である。
- 2) 形有機物の性状の違い、慣習としての扱われ方の違い、廃棄物処理に関する制度の違い、関係法令の違い、コストの違い、事業者のマインドの違い等があり、欧州で発展したようにはその他の地域において進んではない。我国にあっては検討の俎上に乗ることが出来るようになったところで、今後期待される場所である。
- 3) 固形有機物メタン発酵は合理的な手法であるが、微生物分解できない他の廃棄物との混在のなかで、どのように設計できるかが今後を決定してくる。この技術を定着させるための補完的な技術の発展も必要である。

**第 3 章では固形有機物微生物処理法の比較と考察を行った。**

- 1) コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化とのシステム比較において、同じ固形有機物原料を利用する場合には、施設に要求される性能や機能は大きく変わらない。メタン発酵でのバイオガス利用設備は別と考えることができるので、消化液処理の問題が無ければ、施設費用に大差ない。更に運転に際し、直接コンポスト化は通風のための消費動力が多い。
- 2) 接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化でのガスの発生の仕方は、直接コンポスト化では二酸化炭素以外に大量の未反応有機ガスが排出され、これが臭気となる。メタン発酵では、バイオガスに硫化水素が混入するが、硫化水素は処理されてからエネルギー利用されるため臭気の問題は生じない。そのコンポスト化では発生臭気ガス量は極めて少ない。
- 3) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化について、固形有機物の分解性という面から、同じ固形有機物（生ごみ：紙ごみ：籾殻＝100：10：8）について実験行って比較した。その結果、コンポスト化では 46% の有機物分解率であったが、メタン発酵では 72% の分解率があり、メタン発酵の分解能力の高さが際立った。メタン発酵では分解した有機物はバイオガスと

してエネルギー利用できるが、その分、製品コンポスト生産量は少なくなる。同じ水分の製品とすると 19 : 9 でコンポスト化のほうがコンポスト生産量は多い計算となった。

- 4) 直接コンポスト化とメタン発酵・コンポスト化において、その製品コンポストの性能、能力を実験により比較した。同じ固形有機物（生ごみ）について、直接コンポスト化では 46 日間の好気発酵で有機物分解を 70% して製品コンポスト（K コンポスト）を作り、メタン発酵・コンポスト化では有機物分解を 91% 行ってメタン発酵し、その残渣を脱水後 7 日間コンポスト化して製品コンポスト（M コンポスト）を得た。この 2 種類のコンポストについて、栽培試験を実施したところ、対象区 100 に対し、500ml 土壌にそれぞれ 5g の K コンポスト、M コンポストを加えた場合、K コンポストでは発芽率 100、生体重 80 と発育は不良であったが、M コンポストでは発芽率 100、生体重 166 と良好な発育があった。
- 5) 現在我国での有機性廃棄物の再利用の方法は、やはり直接コンポスト化が圧倒的に多い。しかしその製品については、使用者側からすると品質上の不安が多い。一方、メタン発酵・コンポスト化は有機物原料からのエネルギー取り出しに優れるだけでなく、残渣のコンポストにおいても安心して利用できるプロセス的な保証が、雑菌についても、易分解性有機物の残量についても得られる。費用的な問題から直接コンポスト化が選択されることも多いが、環境的に必要な施設を装備するなら大差のないものとなる筈であり、メタン発酵・コンポスト化施設の普及はもっとあってもよいと考える。

#### 第 4 章では固形有機物メタン発酵技術の比較と考察を行った。

- 1) 湿式メタン発酵ではメタン発酵に入る前に、原料有機物のメタン発酵する部分を液中に溶出させて、これからバイオガスを取り出そうとするもので、発酵槽での機械的トラブルを防ごうとするものであるが、その過程で原料有機物のメタン発酵する部分も一部取り出して排除することになる。これは、バイオガス発生量の低下をもたらすとともに、排除したものの腐敗を招き悪臭の発生から逃れられない。またそのために要する電力も大きく、発電量の減少と消費電力の上昇の両方から経済性を悪くする。
- 2) 乾式メタン発酵では原料有機物の破碎と異物除去は行なうものの、そのまま、或いは水で希釈する場合もあるがそのまま、発酵槽に投入する。ある程度破碎された固形有機物を加水分解しメタン発酵するプロセスを全て発酵槽のなかで行う。このことで、原料から得られるバイオガスの全て

を取り出すことができる。消費電力量も小さくなる。

- 3) 湿式メタン発酵と乾式メタン発酵の消費・余剰電力を比較した。原料バイオガス発生量が  $100\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合、余剰電力は、前者では  $45\text{kWh/t-wet}$ 、後者では  $75\text{kWh/t-wet}$  となり、原料が  $120\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合、余剰電力は、前者では  $80\text{kWh/t-wet}$ 、後者では  $110\text{kWh/t-wet}$  となる。更に原料が紙ごみを含む場合、そのバイオガス発生量は  $165\text{m}^3/\text{t-wet}$  の場合も考えることができ、余剰電力は乾式メタン発酵で  $189\text{kWh/t-wet}$  となる。このとき一般的に湿式メタン発酵では紙ごみは排除すべき異物となり、そのバイオガス発生量の恩恵に預かれない。

## 第5章では固形有機物メタン発酵実プラント運転結果と検討を行った。

- 1) わが国で初めて建設された固形有機物メタン発酵プラントは京都市での  $3\text{t-wet/d}$  実証プラントである。ここでは当初分からなかった固形有機物のメタン発酵に関する諸問題点が明らかになってきた。廃棄有機物の種類は多く、その中には窒素濃度の高い場合があり、発酵で発生するアンモニア態窒素は  $3,000\text{ppm}$  を越すと発酵阻害が起こるので、原料構成により予防する必要があること。発酵槽内部の汚泥濃度が  $10\%$  付近に上がってくると異物を排除できるようになることなどが明らかになった。
- 2) 実証プラントではその汚泥を使いながら紙ごみ等のメタン発酵実験も行った。新聞紙では、 $55^\circ\text{C}$  高温メタン発酵の分解量は  $37^\circ\text{C}$  中温発酵の場合の  $3$  倍程度あることや、 $55^\circ\text{C}$  高温メタン発酵においても紙の種類によってバイオガス発生量は大きく異なり、OA 紙やダンボール紙は新聞紙にくらべ  $1.5$  倍程度バイオガス発生量が多いことが明らかになった。紙ごみはこのような分解できることと、窒素含有率が極めて低いことから、メタン発酵原料として優れていることが明らかになった。
- 3) わが国のごみ処理のなかでは、近年環境省から「高効率原燃料回収技術」として原料  $\text{t-wet}$  あたり  $150\text{m}^3$  のバイオガス回収がごみ処理における一つのクリアすべき基準として提示されるようになった。厨芥しか考えないメタン発酵ではこれは達成できず、紙ごみまで考えることで達成でき、そうならば従来の焼却などと比較してもエネルギー観点からもメタン発酵を考えることができるようになることが明らかになった。
- 4) 原料  $\text{t-wet}$  あたり  $150\text{m}^3$  のバイオガス回収基準が可能な家庭系可燃ごみの選別実験をした。湿った紙ごみ等を含む家庭系可燃ごみを機械選別によりメタン発酵原料として利用できるようにして原料  $\text{t-wet}$  あたり  $150\text{m}^3$  以上のバイオガス回収を目指した。機械選別ではスイングハンマー式の破

砕選別スクリーンにおいてスクリーン孔径 50mmφ にすることで、生ごみ 98%、紙ごみ 35% プラスチック・ビニール類は 25% 回収することができて、これを実証プラントで高温メタン発酵運転することで、原料 1 t -wet あたり 167 m<sup>3</sup> のバイオガス回収ができた。

- 5) このことで、ごみ処理も焼却一辺倒でなく、メタン発酵と組み合わせたシステムを考えることで、小規模ごみ処理施設でも発電ができて、自らの運転電力を賄いながら従来と同じように汚水をガス冷却に利用して無放流とすることも可能性が出てきた。
- 6) 最後に我国最初の高温乾式メタン発酵である南丹市商用プラントの運転状況について検討を試みた。食品の賞味期限というルールの中かで発生する高濃度有機物について、食品リサイクル法に合致した施設として建設され高度なリサイクル結果を残した。実際の運転においては、様々な原料有機物について窒素濃度と固形分濃度を推定や分析を行いながら添加水量や投入負荷量を決める必要があり、簡単な運転ではない。又、プラスチックの混入も大量の投入には問題が生じた。窒素濃度の高い原料が来て、これを希釈すると固形分濃度が薄くなり、スカムや沈殿物の問題は直ぐに起こることも経験した。ただ全体を通じては賞味期限切れの食品は紙容器梱包が多く、一般廃棄物のごみも紙ごみが混入してくることで、安定した運転ができた。性能運転では原料 t -wet あたり 200 m<sup>3</sup> 以上のバイオガス発生があり、200 k W h /原料 t -wet の余剰電力を発生し、発酵槽内アンモニア態窒素濃度も 3,000 ppm 以下とした運転ができた。併設された焼却施設との関係では、メタン発酵からは電力と水の供給を炉に行い、炉はメタン発酵から排出されるプラスチックや微生物分解できない木質などを引取り焼却するという関係が成立した。これは 5) で見た小規模ごみ処理施設の形の具体化でもあった。

本論文では固形有機物メタン発酵がどのように、有機性廃棄物の処理、利用に役立てることができるか、それは今どのような状態で我国では開発されているのか、その技術の利用はどんなふうに行うことができるのかについて、検討を行った。今、バイオマス利用はカーボンニュートラルな世界の構築の一環として注目を集めているところでもある。この論文がそのようなことを考えるうえで一助になれば幸いである。



## 6.2 今後の課題

固形有機物メタン発酵は 1990 年代より欧州で発達し、今我国やアジアで検討がすすんでいる。家畜糞尿処理に固形有機物を入れてメタン発酵することについては、欧州は確かに消化液を散布できる土地があるため可能な面はあるにしても、農業者が自らプラントを運転し整備してゆく姿勢は見習う必要があると感じる。一方ごみ処理では欧州に比べ我国では焼却処理施設が普及しているが、近年、メタン発酵もその俎上に乗るようになった。しかし、この適用には未だ答えの出ていない部分が多くある。特に、この方式を組み込むとき、住民の分別協力はプラスチック分別だけでよいのか、厨芥分別までするのか、その手間に対してこのシステムは報いられるのか、或いは焼却だけでのエネルギー回収に比べどうなのか、ごみ質はそのシステムに合っているのか等、考慮すべきことは多くある。この論文はその入口を明らかにしたが、更なる研究がなされれば幸いである。

またそのような計画で欠かせない事柄として、発酵残渣の処理や利用がある。残渣がどんな成分となる原料なのかによって方向は変わるが、それが合理的に収まることで、始めてプラントシステム全体が納得できる形となる。地域でバイオマス利活用を行ってゆく場合も、一つのプロセスだけでなく、いくつかのプロセスの集合で合理的な形を目指すことになり、それらの統合が必要になる。この点においても更なる研究を積み重ねてゆきたい。

## 謝辞

本論文は株式会社 タクマ在籍中に行った研究などを基に、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻（環境システム工学講座）の社会人博士後期課程での研究成果を加えたものです。

京都大学における研究に際して、京都大学大学院工学研究科教授津野洋博士には、本研究を遂行し論文を作成するにあたり、熱心な御指導や助言、暖かい配慮を賜りました。深く感謝いたします。

また、調査委員として査読をいただき、貴重な助言を賜りました京都大学大学院工学研究科教授森澤眞輔博士、同じく京都大学大学院工学研究科教授清水芳久博士に深く感謝いたします。

また京都大学大学院工学研究科助教日高平博士には研究中から論文作成まで、数多くの配慮を頂き感謝します。

株式会社タクマでの研究では手島肇博士には、本研究のきっかけとなる指示を頂き、固形有機物メタン発酵技術の提携から始まりその研究会立ち上げ、実証プラント建設、運転等を行うに至りました。そして手島肇博士には、本社会人博士後期課程への入学を薦められ今日に至りました。深く感謝します。

また、京都大学大学院工学研究科水環境工学研究室においては、洪鋒博士と萩原亘君に、実験や研究の遂行に尽力をいただき深く感謝します。

本研究の固形有機物メタン発酵技術導入にあっては、他の民間会社5社とともに実証プラントを建設し実施してきました。提携各社からの技術者が集結して本技術の習得、研究があって多くの結果が得られ、本研究につながっており、関係各位に御礼申し上げます。

本実証プラント建設後、そのプラントの運転指針や方針を決める研究会を立ち上げましたが、そこでは京都大学名誉教授武田信生博士ならびに津野洋博士に御指導をいただき、研究を進めて行くことができました。感謝します。

また、終始この技術の導入、実証プラント建設運転にあっては株式会社タクマの諸氏の力があってなされており、入江直樹氏、岩崎大介氏、河野孝志博士、芹沢佳代氏に深く感謝します。また引き続いて南丹市のメタン発酵プラントの建設運転にあっては河村公平氏の苦労なくしては進まなかったことも特筆したいと思います。

最後に妻葉子をはじめとする家族の理解と励ましに深く感謝し、謝辞とさせて頂きます。